



Il Commissario Straordinario del Governo  
per il recupero e la valorizzazione dell'ex carcere borbonico  
dell'isola di Santo Stefano - Ventotene



Comune di Ventotene  
REGIONE LAZIO

**CONTRATTO ISTITUZIONALE DI SVILUPPO**

**RECUPERO E RIFUNZIONALIZZAZIONE EX CARCERE BORBONICO DELL'ISOLA DI SANTO STEFANO VENTOTENE**

Intervento 3.a "Realizzazione/adequamento degli approdi all'Isola di Santo Stefano, Opere di mitigazione del rischio crolli sulla Falesia "



**STAZIONE APPALTANTE**



Agenzia nazionale per l'attrazione  
degli investimenti e lo sviluppo d'impresa SpA

**Funzione Servizi di Ingegneria**

ATTIVITA' TECNICHE  
Beni Culturali e Architettura  
Arch. Rosa di NUZZO

**INVITALIA S.p.a.:** Soggetto Attuatore in ottemperanza agli artt. 3 e 8 del Contratto Istituzionale di Sviluppo  
"Recupero e rifunionalizzazione ex carcere borbonico dell'isola di Santo Stefano Ventotene"

**RESPONSABILE UNICO DEL PROCEDIMENTO:** Dott. Ing. ENRICO FUSCO

**COORDINAMENTO PROGETTAZIONE:** Dott. Arch. Rosa di NUZZO

**PROGETTAZIONE ARCHITETTONICA**  
Dott. Arch. Massimo BARAGLI

**PROGETTAZIONE STRUTTURALE**  
Dott. Ing. Letterio SONNESSA

**PROGETTAZIONE OPERE MARITTIME**  
Dott. Ing. Daniele BENOTTI

**RELAZIONE GEOLOGICA**  
Dott. Geol. Vincenzo GUIDO

**PROGETTAZIONE IMPIANTI**  
Dott. Ing. Pierluigi ROSATI  
Dott. Ing. Osvaldo PITORRI

**PROGETTAZIONE DELLA SICUREZZA**  
Dott. Ing. Nunzio LAURO

**PROGETTAZIONE AMBIENTALE e PROCEDURE VIA-Vinca**  
Dott. Luca DI NARDO

**COMPUTI E STIME**  
Geom. Luigino D'ANGELANTONIO

**RELAZIONE ARCHEOLOGICA:** ASPSP Servizi Archeologici snc, Dott.ssa Laura SANNA e Francesco TIBONI

**GRUPPO DI LAVORO INTERNO**

**PROGETTAZIONE ARCHITETTONICA:**  
Dott. Ing. Francesco DE SIMONE  
Dott. Arch. Ahmed ELGAZZAR  
Dott. Arch. Lucia PACITTO

**PROGETTAZIONE STRUTTURALE:**  
Dott. Ing. Mario D'AMATO  
Dott. Ing. Francesco DI LAURO

**PROGETTAZIONE OPERE MARITTIME:**  
Dott. Ing. Leonardo GUALCO

**PROGETTAZIONE IMPIANTI:**  
Sig. Ennio REGNICOLI

**RILIEVI E RESTITUZIONE GRAFICA:**  
Geom. Gennaro DI MARTINO  
Dott. Ing. Francesco DE SIMONE  
Dott. Arch. Ahmed ELGAZZAR

**PROGETTAZIONE DELLA SICUREZZA**  
Dott. Arch. Ahmed ELGAZZAR

**SUPPORTO TECNICO OPERATIVO**

**PROGETTAZIONE OPERE MARITTIME:**  
3TI Progetti Italia - Ingegneria Integrata SpA  
Dott. Ing. Stefano Luca POSSATI

**PROGETTAZIONE AMBIENTALE e PROCEDURE VIA-Vinca:**  
SETIN Servizi tecnici Infrastrutture s.r.l.  
Dott. Alessandro PIAZZI

**PROGETTAZIONE GEOTECNICA:**  
STUDIO TECNICO ASSOCIATO - SINTESI  
Dott. Ing. Germano GUIDUCCI

**PROGETTAZIONE IDRAULICA E MARITTIMA**  
DHI Srl  
Dott. Ing. Luis Alberto CUSATI

**INGEGNERIA NAVALE**  
Dott. Ing. Francesco PRINZIVALLI

**CONSULENZA TECNICO-SCIENTIFICA**  
Prof. Ing. Paolo SAMMARCO

**INDAGINI GEOGNOSTICHE :**  
Geodes Laboratori  
Dott.ssa M. Gabriella BEVILACQUA

**INDAGINI E RILEVAZIONI AMBIENTALI, ARCHEOLOGICHE E STRUMENTALI A MARE :**  
Enviroconsult srl - Dott. Ing. Roberto SAGGIOMO

**INDAGINI SULLE STRUTTURE :**  
ICS Centro Sperimentale di Ingegneria Srl  
Dott. Ing. Giuseppe MONTELLA

**INDAGINI GEOMECCANICO :**  
Geoapp Srl  
Dott. Paolo FARINA

**PROGETTO DEFINITIVO**

ELABORATO			DATA	NOME	FIRMA
Progetto Strutturale			REDATTO	05-03-2021	G.GUIDUCCI
Mitigazione del rischio di instabilità del versante			VERIFICATO	05-03-2021	L.SONNESSA
Scalo n. 4			APPROVATO	05-03-2021	Rosa di NUZZO
Relazione geotecnica e sulle fondazioni			DATA	05-03-2021	CODICE BREVE
			SCALA	----	
REVISIONE	DATA	AGGIORNAMENTI	CODICE ELABORATO		
Rev. 1	13-09-2021	Revisione in sede di procedura di VIA	2017E037INV-02-D-S0-RF0003		
Rev. 2	20-11-2023	Integrazione condizione ambientale n.6	CODICE FILE		
Rev. 3			2017E037INV-02-D-S0-RF0001.dwg		

**S0-RF0003**

## 1 SOMMARIO

1	SOMMARIO.....	0
2	PREMESSA.....	2
3	NORMATIVA TECNICA DI RIFERIMENTO .....	5
3.1	<i>Normativa tecnica</i> .....	5
3.2	<i>Documenti progettuali</i> .....	6
4	INQUADRAMENTO GEOLOGICO .....	8
4.1	<i>Premessa</i> .....	8
4.2	<i>Geologia</i> .....	8
4.3	<i>Indagini pregresse ed integrative – Rilievo geomeccanico</i> .....	9
4.4	<i>Unità stratigrafiche Isola di Santo Stefano</i> .....	14
4.5	<i>Vincoli idrogeologici</i> .....	18
4.6	<i>Elementi della falesia a rischio crollo</i> .....	20
5	DESCRIZIONE DEGLI INTERVENTI DI SOMMA URGENZA ESEGUITI NEL 2023 .....	29
5.1	<i>Premessa</i> .....	29
5.2	<i>Zone di intervento</i> .....	31
5.3	<i>Tipologie degli interventi</i> .....	34
5.3.1	Intervento 1: Ispezione e pulizia della parete rocciosa .....	34
5.3.2	Intervento 2: Demolizione di porzioni rocciose in precarie condizioni di stabilità.....	34
5.3.3	Intervento 3: Rafforzamento e protezione della parete rocciosa mediante chiodature con barre metalliche, reti e funi in acciaio.....	36
6	DESCRIZIONE DEGLI INTERVENTI IN PROGETTO .....	40
6.1	<i>Tipologie e zone di intervento</i> .....	40

<b>7</b>	<b>MATERIALI .....</b>	<b>43</b>
7.1	<i>Chiodature con barre tipo Dywidag .....</i>	<b>43</b>
7.2	<i>Rete metallica.....</i>	<b>43</b>
7.3	<i>Fune metallica .....</i>	<b>44</b>
<b>8</b>	<b>Analisi di stabilità dei cunei e delle chiodature di consolidamento .....</b>	<b>45</b>
8.1	<i>Premessa .....</i>	<b>45</b>
8.2	<i>Metodologia di analisi tridimensionale dei cunei di roccia.....</i>	<b>45</b>
8.3	<i>Dati di input.....</i>	<b>46</b>
8.3.1	Volume e peso del cuneo di progetto .....	46
8.3.2	Spinta sismica del cuneo di roccia .....	47
8.3.3	Resistenza allo sfilamento del singolo elemento di chiodatura .....	48
8.4	<i>Risultati delle analisi.....</i>	<b>49</b>
<b>9</b>	<b>MONITORAGGIO .....</b>	<b>55</b>
1.1	<i>Premessa .....</i>	<b>55</b>
1.2	<i>Tipologie delle misure e degli strumenti .....</i>	<b>56</b>
1.2.1	Mire Topografiche (MT) .....	56
1.2.2	Celle di Carico sulla testata delle barre di chiodatura (CC) .....	57
1.2.3	Misuratori di giunti o fessurimetri (MG) .....	58
1.2.4	Termometri (TM).....	59
1.2.5	Monitoraggio su basi fotografiche .....	59
1.3	<i>Figure con l'ubicazione dei punti di misura .....</i>	<b>63</b>
1.4	<i>Durata del monitoraggio e frequenze delle misure .....</i>	<b>65</b>
1.5	<i>Annotazioni .....</i>	<b>66</b>

 Agenzia nazionale per l'attrazione degli investimenti e lo sviluppo d'impresa SpA	2017E037INV-02-D-S0-RF0003
	Rev. 1
	Pag. 2/68

## 2 PREMESSA

La presente relazione è parte integrante del progetto relativo all'intervento n. 3.a di *“Realizzazione/adequamento degli approdi all'isola di Santo Stefano – Opere di mitigazione del rischio crolli sulla falesia”*, rientrante tra gli interventi contemplati nell'Accordo Operativo tra il Ministero per i beni e le Attività Culturali e per il Turismo e l'Agenzia Nazionale per l'attrazione degli investimenti e lo sviluppo d'impresa (Invitalia S.p.A.) per la realizzazione delle attività di soggetto attuatore del Contratto Istituzionale di Sviluppo (CIS) per il Recupero e la Rifunionalizzazione dell'Ex Carcere Borbonico dell'isola di S. Stefano Ventotene.

L'intervento generale di *Realizzazione/adequamento degli approdi all'isola di Santo Stefano*, considerata la peculiare condizione di insularità, con vincoli ambientali e difficoltà di accesso terrestre per la morfologia scoscesa della costa che riguarda l'intera isola, prevede la realizzazione in generale di opere di minimo impatto, privilegiando due punti di sbarco, già storicamente utilizzati, in posizioni diversamente esposte al mare, per consentirne l'uso alternativo in occasione di mareggiate, in relazione alla direzione di provenienza; i due approdi sono denominati scalo della Marinella, in posizione nord-ovest, e scalo n. 4, in posizione nord-est.

La realizzazione delle opere a mare nello scalo della Marinella è subordinata alla messa in sicurezza della falesia prospiciente l'approdo, vista la perimetrazione dell'area a pericolosità A e a rischio frana R4, riportata nel Piano di Assetto Idrogeologico (P.A.I.), predisposto dall'Autorità di Bacino del Distretto Idrografico Centrale.

Il presente progetto si riferisce, nello specifico, alle opere di mitigazione del rischio crolli sulle falesie prospicienti i due approdi; nel caso dello scalo 4 il progetto riguarderà anche la messa in sicurezza dei muretti a secco presenti lungo il percorso a gradoni, che conduce all'ex carcere borbonico, per la quale si rimanda all'elaborato 2017E037INV-02-D-S0-RF0002.

Nella presente relazione si riportano le analisi relative agli interventi integrativi previsti per la mitigazione del rischio di instabilità del versante della falesia nello scalo 4; si tratta, nello specifico, di due interventi, previsti in tre zone distinte, consistenti principalmente nella pulizia e

rimozione mediante disaggio delle porzioni di rocciose in precarie condizioni di stabilità e nei rinforzi con singole chiodature.

A seguito delle osservazioni condotte sulle falesie dello scalo n.4 dell'Isola di Santo Stefano e, più in dettaglio, sui dissesti geo-idrologici che ne minacciano la stabilità, nei mesi scorsi sono stati eseguiti alcuni interventi in somma urgenza, a tutela della sicurezza delle maestranze attualmente impegnate sull'isola nell'ambito dei lavori di *“Recupero e rifunzionalizzazione ex carcere Borbonico dell'isola di Santo Stefano Ventotene - Intervento n. 1 Messa in sicurezza degli edifici”*, di cui al relativo Contratto Istituzionale di Sviluppo.

Il Piano di sicurezza e coordinamento relativo ai lavori in corso prevede due punti di sbarco sull'isola di Santo Stefano, *“Marinella”* e *“Scalo n.4”*, individuando il percorso che parte dallo scalo *“Marinella”* quale viabilità principale di cantiere per il transito del personale e di piccole attrezzature, declassando quello dello scalo 4 a viabilità alternativa, a causa dell'elevata pendenza del tracciato.

L'esigenza di eseguire gli interventi in somma urgenza è nata per voler migliorare le condizioni di accesso in sicurezza delle maestranze impiegate sull'isola, nel caso in cui fosse utilizzato lo scalo n.4, per l'impraticabilità della Marinella, per le avverse condizioni meteo marine.

I lavori sono stati consegnati il giorno 12/07/2023 e sono stati ultimati in data 29/09/2023, come riportato nel certificato di ultimazione del 4/10/2023, nel rispetto dei termini contrattuali.

La progettazione ha ottenuto il parere positivo dell'Autorità di Bacino prot. n 11843\_11844\_12320\_2023.

Ad integrazione degli interventi in somma urgenza realizzati, nell'ambito del presente progetto sono state individuate tre porzioni di falesia sulle quali si è ritenuto opportuno intervenire attraverso opere di mitigazione, come descritto nel seguito.

Tutte le informazioni utili alla redazione della presente relazione sono state ricavate dalle ricognizioni effettuate e dalla consultazione dei documenti seguenti, allegati al progetto:

- 2017E037INV-01-D-GE-RGEO000: *Relazione Geologica*, redatta dal Dott. Geol. Vincenzo Guido;

- *Relazione Tecnica sulle indagini di Rilevamento Geologico-Tecnico e Analisi di Stabilità GEODES - Rev. 1 del 07.12.2020, di cui alle indagini eseguite dalla Geodes Laboratori di Bevilacqua M. Gabriella nel mese di ottobre 2020. 2020 (codice elaborato: 2017E037INV-02-D-GE-IND001);*
- *Relazione Tecnica sulle Rilievi geomeccanici integrativi da remoto, eseguiti da Geoapp s.r.l. – codice elaborato codice elaborato 2017E037INV-02-D-GE-IND002;*

### 3 NORMATIVA TECNICA DI RIFERIMENTO

#### 3.1 Normativa tecnica

Le normative di riferimento utilizzate sono le seguenti:

DM 17.01.2018	Aggiornamento delle Nuove norme tecniche per le costruzioni (di seguito NTC-2018);
CIRCOLARE 21 GENNAIO 2019, N. 7	Istruzioni per l'applicazione delle nuove norme tecniche per le costruzioni di cui al DM 17/01/2018 (DI SEGUITO Circolare di applicazione NTC-2018);
MINISTERO DELL'INTERNO CORPO NAZIONALE DEI VIGILI DEL FUOCO	Vademecum STOP – schede tecniche delle opere provvisorie per la messa in sicurezza post-sisma da parte dei vigili del fuoco. Aprile 2010;
AUTORITA' DEI BACINI REGIONALI DEL LAZIO	PIANO STRALCIO PER L'ASSETTO IDROGEOLOGICO (P.A.I.) – Norme di Attuazione. (B.U.R.L. n. 21 del 07/06/2012 – S.O. n. 35);
AUTORITA' DEI BACINI REGIONALI DEL LAZIO	PIANO STRALCIO PER L'ASSETTO IDROGEOLOGICO (P.A.I.) – Relazione Tecnica (B.U.R.L. n. 21 del 07/06/2012 – S.O. n. 35);

Ad integrazione delle sopracitate norme e per quanto con esse non in contrasto, sono stati consultati i documenti di seguito indicati:

- Eurocodici strutturali pubblicati dal CEN, con le precisazioni riportate nelle Appendici Nazionali
- Norme UNI EN armonizzate i cui riferimenti siano pubblicati su Gazzetta Ufficiale dell'Unione Europea
- Norme per prove, materiali e prodotti pubblicate da UNI
- Istruzioni del Consiglio Superiore dei Lavori Pubblici
- Linee Guida del Servizio Tecnico Centrale del Consiglio Superiore dei Lavori Pubblici

 Agenzia nazionale per l'attrazione degli investimenti e lo sviluppo d'impresa SpA	2017E037INV-02-D-S0-RF0003
	Rev. 1
	Pag. 6/68

- Istruzioni e documenti tecnici del Consiglio Nazionale delle Ricerche (CNR).

### 3.2 Documenti progettuali

Per quanto riguarda gli interventi descritti, si riporta di seguito l'elenco degli elaborati progettuali di riferimento:

- 2017E037INV-02-D-GE-RGEO000: Relazione Geologica;
- Relazione Tecnica sulle indagini di Rilevamento Geologico-Tecnico e Analisi di Stabilità GEODES - Rev. 1 del 07.12.2020. 2020 (codice elaborato: 2017E037INV-02-D-GE-IND001);
- *Relazione Tecnica sulle Rilievi geomeccanici integrativi da remoto, eseguiti da Geoapp s.r.l. (codice elaborato 2017E037INV-02-D-GE-IND002);*
- 2017E037INV-02-D-S0-TAV004: *"Progetto Strutturale - Mitigazione locale del rischio di instabilità della falesia. Scalo n.4: Planimetria, Prospetto, Sezioni e dettagli costruttivi"*.
- 2017E037INV-02-D-S0-TAV005: *"Progetto Strutturale - Mitigazione locale del rischio di instabilità della falesia. Falesia Marinella e Scalo n.4 e Cimitero: Schemi installazione punti di misura per il monitoraggio"*.

Si citano, inoltre, gli elaborati tecnici *as-built* relativi agli interventi locali di mitigazione del rischio dovuto ai crolli di elementi litoidi dalla falesia eseguiti nei *"Lavori di somma urgenza ex art. 163 D.Lgs. n. 50/2016 e ss.mm.ii. – falesie approdo scalo n. 4"*, allegati al progetto, di cui all'elenco seguente:

- 2017E037INV-03-SU-G0-ASB-RT01: *"Studio di compatibilità geomorfologica degli interventi - Relazione geologica, Studio di compatibilità geomorfologica"*.
- 2017E037INV-03-SU-G0-ASB-RT02: *"Studio di compatibilità geomorfologica degli interventi - Report verifiche di stabilità del pendio"*.
- 2017E037INV-03-SU-G0-ASB-RT03: *"Studio di compatibilità geomorfologica degli interventi - Rilievi geomeccanici integrativi da remoto"*.
- 2017E037INV-03-SU-G0-ASB-RT04: *"Studio di compatibilità geomorfologica degli interventi - Rilievi geomeccanici prima campagna"*.

- 2017E037INV-03-SU-G0-ASB-TAV01: *“Studio di compatibilità geomorfologica degli interventi – Carta geologica Planimetria”.*
- 2017E037INV-03-SU-G0-ASB-TAV02: *“Studio di compatibilità geomorfologica degli interventi – Carta geologica Sezioni A-A', B-B', C-C”.*
- 2017E037INV-03-SU-G0-ASB-TAV03: *“Studio di compatibilità geomorfologica degli interventi – Carta geomorfologica Planimetria”.*
- 2017E037INV-03-SU-S0-ASB-RT01: *“Progetto strutturale - As built – Relazione Tecnica”.*
- 2017E037INV-03-SU-S0-ASB-TAV01: *“Progetto strutturale - As built – Mitigazione locale del rischio di instabilità della falesia. Scalo n.4: Planimetria e prospetto”.*
- 2017E037INV-03-SU-S0-ASB-TAV02: *“Progetto strutturale - As built – Mitigazione locale del rischio di instabilità della falesia. Scalo n.4: Sezioni e dettagli costruttivi: Barre di chiodatura, reti e funi aderenti”.*

## 4 INQUADRAMENTO GEOLOGICO

### 4.1 Premessa

Si riportano di seguito alcuni estratti dalla relazione geologica, a firma del dott. Geol. Vincenzo Guido, alla quale si rimanda per i relativi approfondimenti.

### 4.2 Geologia

Ventotene è quel che resta di un grande vulcano, in parte collassato in mare. Non si conosce l'età esatta del vulcano ma è probabilmente stato attivo insieme al domo di Monte La Guardia di Ponza e la sua attività è proseguita fino a circa 400-300.000 anni fa. L'attività di Ventotene è stata essenzialmente esplosiva anche se non mancano le colate di lava. L'ultima eruzione potrebbe aver causato il collasso della parte terminale dell'edificio. Un ultimo dato interessante che merita attenzione è la bella superficie di terrazzamento marino ben visibile in cima alla falesia di Chiaia di Luna. Questa superficie testimonia il livello del mare circa 90.000 anni fa. La superficie è stata innalzata poi alla quota attuale per problemi di variazione del livello del mare, isostasia e forse anche tettonica.

Ventotene e Santo Stefano rappresentano la parte sommitale di un antico vulcano, che si stima raggiungesse un'altezza di circa 1000 metri e un diametro di una ventina di chilometri. Dal punto di vista vulcanologico le due isole appartengono alla cosiddetta provincia campana, assieme al vulcano di Roccamonfina, ai Campi Flegrei, a Ischia e al Vesuvio. Ventotene rappresenta probabilmente il residuo di uno strato-vulcano; nella porzione conservata si distinguono una zona inferiore, con livelli piroclastici e lave trachi-basaltiche datate 1,7 milioni di anni, una zona intermedia, formata tutta da tufo, e una zona superiore, con depositi tufitici (Bergomi et al., 1969). Nell'isola di Santo Stefano, invece, le vulcaniti più antiche sono lave risalenti a 1,2 milioni di anni fa.

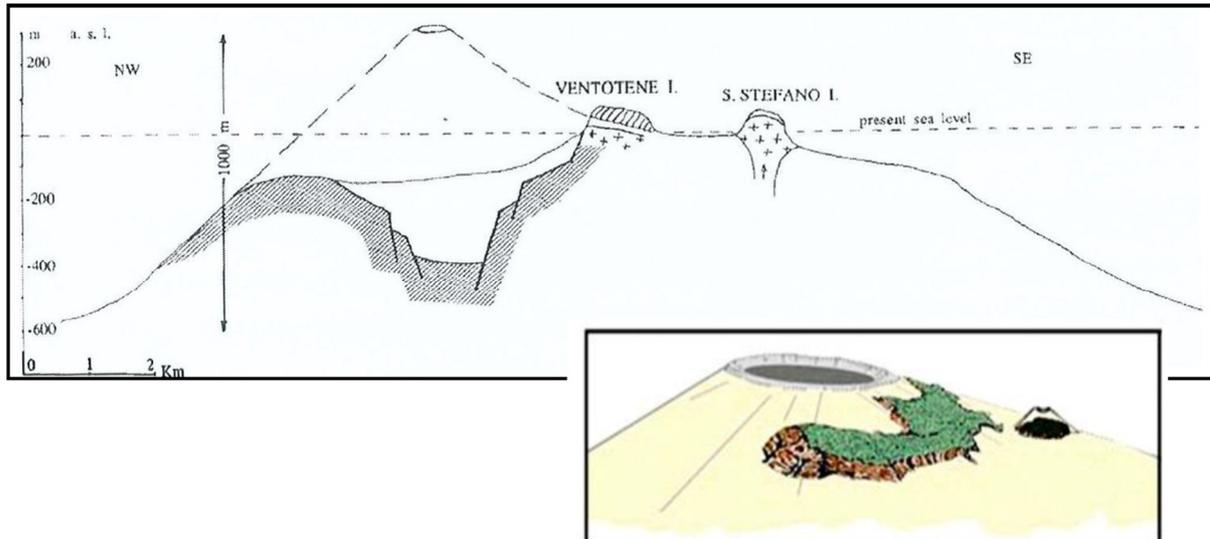


Figura 1: schema geologico esemplificativo delle isole di Ventotene e S. Stefano – da Bergomi et lii, 1969

#### 4.3 Indagini pregresse ed integrative – Rilievo geomeccanico

Per la caratterizzazione delle falesie dell'isola di Santo Stefano e, nello specifico, della falesia prospiciente l'attuale scalo n.4, ha svolto un ruolo chiave la campagna di rilevamento geostrutturale, di cui all'elaborato indagini denominato *“Relazione tecnica sulle indagini di rilevamento geologico-tecnico e analisi di stabilità”*, allegato al progetto *“Intervento n. 3 Realizzazione/adequamento degli approdi all'Isola di Santo Stefano”*, eseguita nel mese di novembre 2020, su n.3 stazioni geomeccaniche (uno presso scalo n.4 e due presso scalo Marinella), secondo i criteri e le raccomandazioni della ISRM (International Society for Rock Mechanics).



**Figura 2: Stazioni geomeccaniche SG3 nella zona dello scalo n. 4.**

Per ogni stazione sono state stimate le dimensioni dei blocchi di roccia formati, attraverso la formula di Palmstrom [2005], definendo un valore variabile tra 1.86 e 4.48 m<sup>3</sup> come volume medio degli elementi (VB) che si possono formare a seguito dei distacchi (in riferimento alle stazioni in corrispondenza dello scalo Marinella).

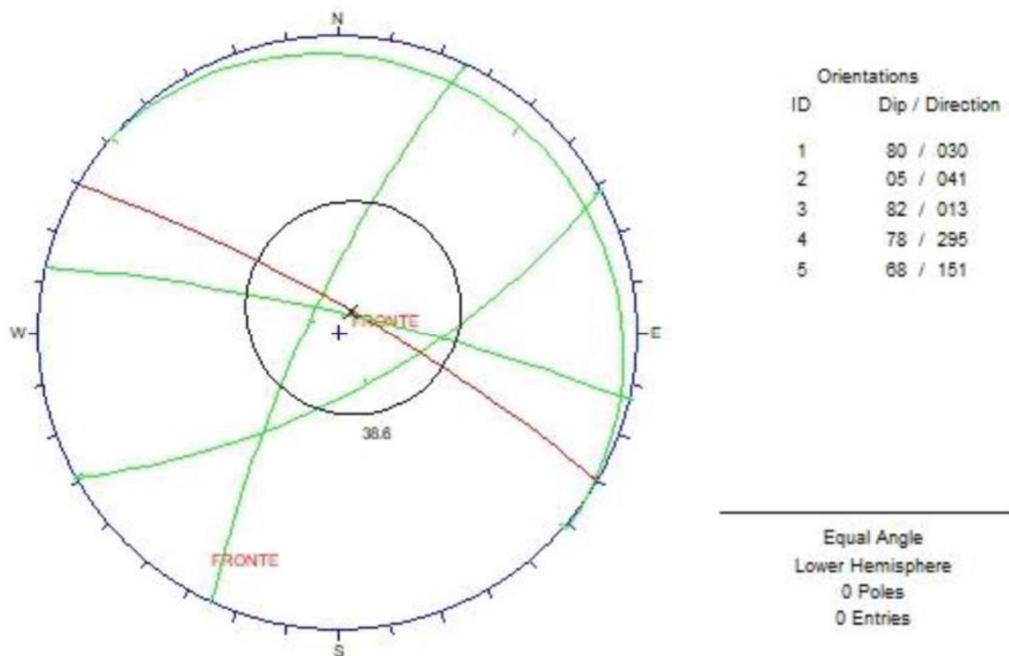
Tale stima, ancorché approssimativa per lo scalo 4, vista la limitatezza della porzione di rilievo, può essere comunque indicativa per il dimensionamento di interventi di chiodatura.

Lo studio include le seguenti principali caratterizzazioni:

- **Rugosità**, con il pettine di **Barton**: JRC = 10÷16 (in una scala da 0 a 20), con conseguente resistenza a compressione dei giunti inclusa tra 25 e 55 MPa.
- **Geological Strength Index** di **Marinos e Hoek**, indice dello stato di fratturazione: GSI = 65÷70 (su una scala da 5 a 95).
- **Rock Mass Rating** di **Bieniawski**, basato su resistenza a compressione monoassiale, Rock Quality Designation, spaziatura, condizioni delle discontinuità e condizioni idrauliche dei giunti: RMRc (corretto) = 36÷38 (su una scala da 0 a 50), con conseguente coesione media di 305÷315 kPa e angolo di resistenza al taglio di 35.5÷36.5°.
- **Slope Mass Rating** di **Romana**: risulta SMR=76.9÷78.9, che identifica ammassi di qualità buona e mal predisposti sia a fenomeni di scivolamento che fenomeni di ribaltamento.

Infine, è stato eseguito il *test di Markland* per ogni stazione geomeccanica rilevata in campagna. Tale test, considerando i meccanismi di movimento di scivolamento planare, ribaltamento e distacco di cunei, misura la predisposizione al cinematismo e l'ammissibilità dinamica dello stesso, sulla base delle giaciture rilevate e dei parametri di attrito dati dal metodo di Bieniawsky, per ciascuna stazione.

I risultati ottenuti sono i seguenti per lo scalo n.4:



stazione	scorrimento planare	distacco cunei di roccia	compatibilità cinematica	compatibilità dinamica	angolo di attrito	famiglie di fratture (joint)
SG3	SI	NO	solo scivolamenti planari	NO*	38,6	3-4 e 4-5

\*dove l'immersione della parete rocciosa si presenta verso nord- nord ovest, si può verificare la compatibilità dinamica ai crolli di cunei (caso dell'insenatura in corrispondenza dell'approdo-osservare verifica di Markland sopra riportata)

La tabella sopra riportata mostra come il test di Markland eseguito per la stazione di misura SG3, presso lo scalo n.4, non evidenzia instabilità cinematica o dinamica per crolli di cunei di roccia; tuttavia, dove l'immersione della parete rocciosa si presenta verso nord- nord ovest, si può verificare la compatibilità dinamica ai crolli di cunei (caso dell'insenatura in corrispondenza dell'approdo n.4), come descritto di seguito.

Come riportato in premessa, è stato eseguito un ulteriore approfondimento dello stato

conoscitivo attraverso l'affidamento e la esecuzione di servizi di rilievo geomeccanico da remoto dell'ammasso roccioso, presso gli scali interessati, mediante l'impiego di drone e laser scanner da terra. Il nuovo rilievo ha fornito una cartografia di dettaglio della falesia con indici cinematici della probabilità di avvenimento di un determinato evento, aggiungendo ai cinematicismi di scivolamenti planari e scivolamenti di cunei, della precedente indagine, il ribaltamento flessurale, la caduta libera di cuneo e ribaltamento di blocchi. La pericolosità di alcune zone attenzionate viene di fatto confermata dalla consultazione degli esiti dell'indagine richiamata.

Di seguito si riporta la restituzione del rilievo nell'area dell'avvenuto crollo; il rilievo è stato eseguito circa quindici giorni prima dell'evento franoso richiamato in premessa e ciò ha permesso di calibrare la scala degli indici di pericolosità; infatti, analizzando i valori degli indici di pericolosità nella zona di distacco si ottiene un valore medio di GKI (indice cinematico globale) pari a 37.7% ed un valore massimo pari a 59.1%.

Come si può notare dalla figura 5, la zona da cui si è originato il crollo è caratterizzata da valori elevati di indice di pericolosità cinematica; gli alti valori riscontrati sono dovuti principalmente a ribaltamento flessurale (FT, flexural toppling) e caduta libera (FF, free fall) che risultano essere stati, probabilmente, i meccanismi responsabili del crollo.

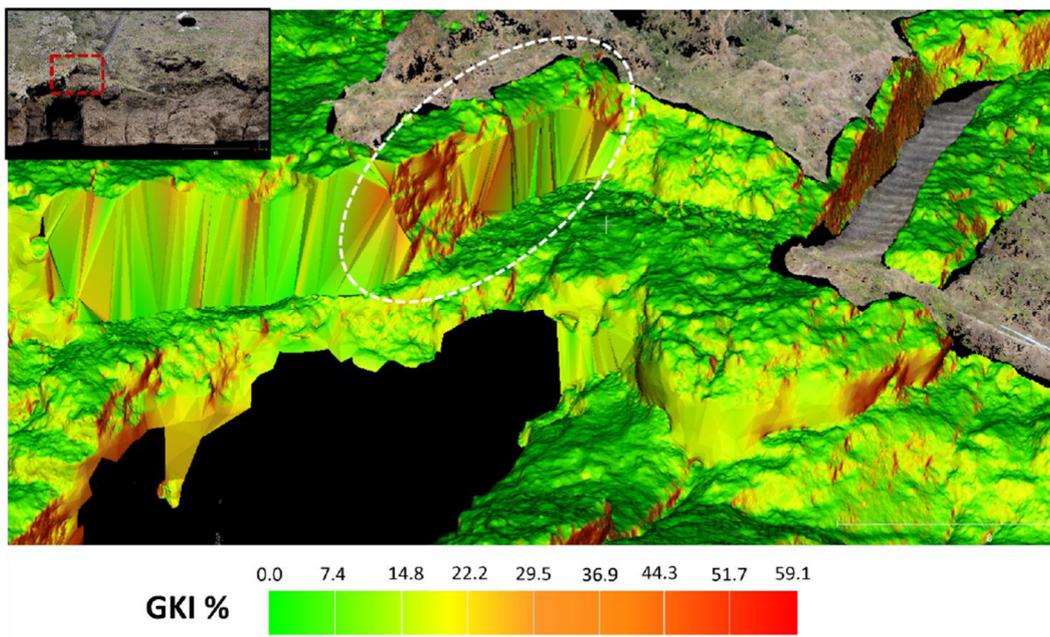
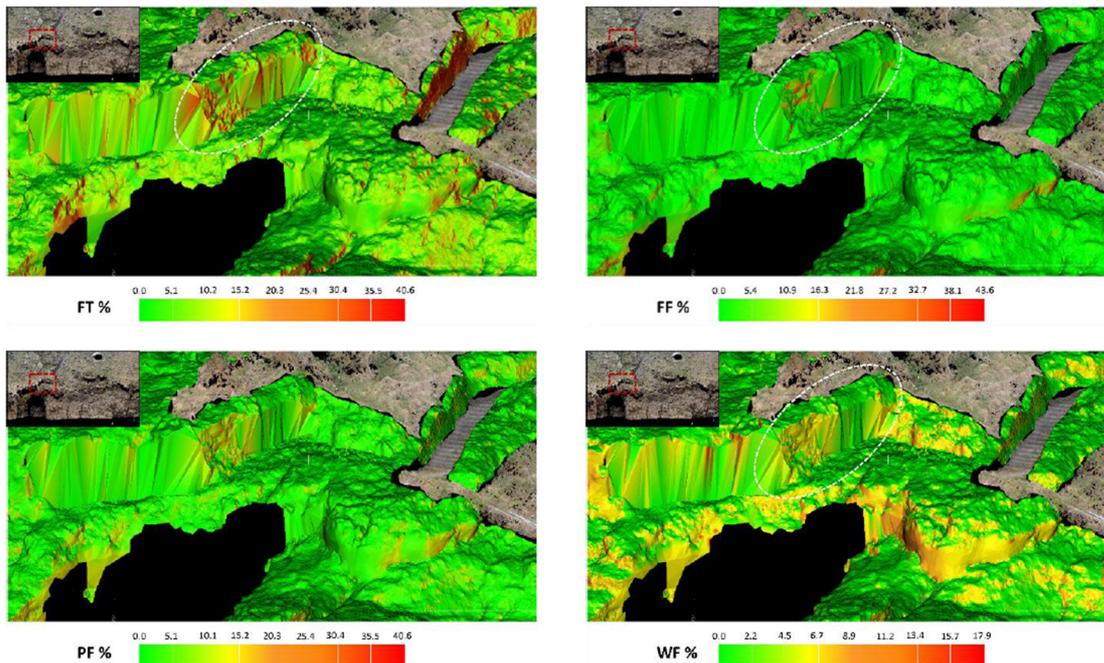


Figura 3: Indice di pericolosità cinematica globale della zona di dettaglio crollo presso lo Scalo n.4 con

**individuazione dell'incide di pericolosità presente pre-evento nell'area di distacco (tratteggio bianco).**



**Figura 4: Indice di pericolosità per ribaltamento flessurale (FT, in alto a sinistra), caduta libera (FF, alto a destra), scivolamento planare (PF, in basso a sinistra) e per scivolamento di cunei (WF, in basso a destra) sulla zona di crollo presso lo scalo n.4 con individuazione delle aree a maggiore pericolosità (tratteggio bianco).**

Più in generale, per lo scalo n.4, dai valori della Tabella sotto riportata, si evince che i meccanismi di dissesto con indice più alto siano quelli di caduta libera con valori massimi di 43.5%, scivolamento planare e ribaltamento di flessura, entrambi con valori massimi di 40.6%. Gli altri meccanismi mostrano indici nettamente più bassi con valori massimi rispettivamente pari a 17.9% per lo scivolamento di cunei ed 1.8% per il ribaltamento di blocchi (praticamente assente). Analizzando però i valori medi dei tre meccanismi con indice più alto si nota come il meccanismo di caduta libera è quello meno diffuso nonostante registri il valore di picco più alto in quanto presente solo nelle porzioni di aggetto. Il meccanismo più probabile è invece il ribaltamento per flessura, che ha un valore medio maggiore e una deviazione standard minore, indice di una diffusione più omogenea nell'area. Ai meccanismi citati in precedenza si aggiunge anche il

meccanismo di scivolamento di cunei (WF, wedge failure) che, presenta un valore di picco nettamente inferiore rispetto ai meccanismi citati in precedenza e un valore medio abbastanza ridotto, sintomo di una diffusione limitata nell'area. Il meccanismo di ribaltamento di blocchi (BT, block toppling) risulta invece essere quasi assente, con valori ridotti sia per il massimo che per la media. I valori massimi dell'indice cinematico globale sono pari a 59.1%.

	PF (%)	WF (%)	BT (%)	FF (%)	FT (%)	GKI (%)
<b>max</b>	40.6	17.9	1.8	43.5	40.6	59.1
media	1.8	1.6	0.4	0.6	4.6	8.6
dev std	3.9	3.0	0.5	2.9	7.5	11.7

Figura 5: Valori massimi, minimi e deviazione standard degli indici di instabilità cinematica per lo Scalo n.4

#### 4.4 Unità stratigrafiche Isola di Santo Stefano

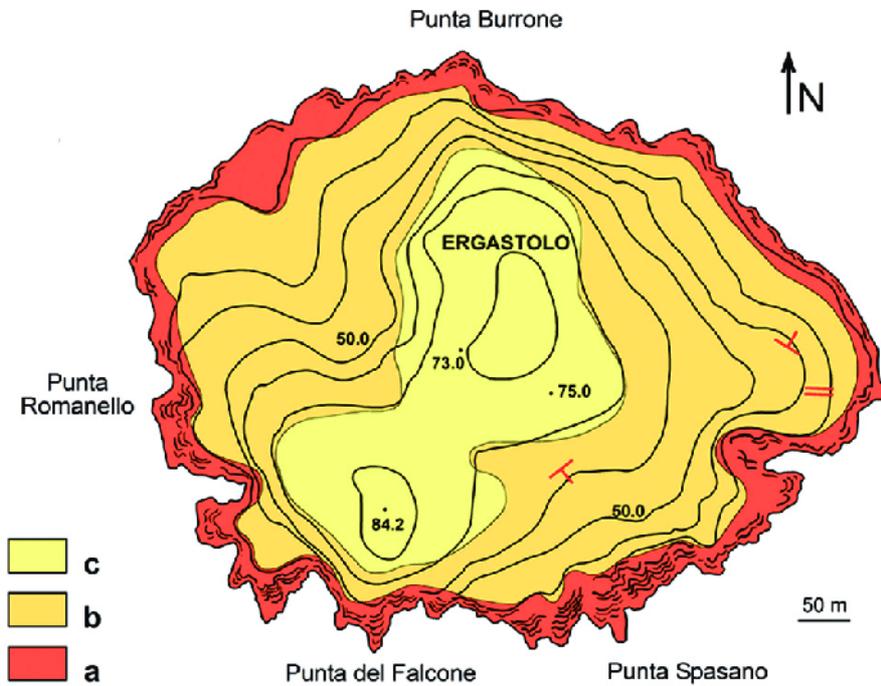
L'isola di Santo Stefano appartiene all'arcipelago delle isole pontine, ed è situata a 30 Km a sud del Golfo di Gaeta, sul bordo della piattaforma continentale; con Ventotene appartiene alle Isole Pontine Orientali. Anche se le due isole oggi sono nettamente separate, rappresentano i resti di un grande edificio vulcanico chiamato "Vulcano Ventotene", che è stato attivo tra 0,92 Ma e 0,33 Ma in accordo con la datazione isotopica K/Ar (Metrich et al. 1988; Bellucci et al. 1999a, 1999b).



**Figura 6: stralcio foto satellitare dell'arcipelago delle isole pontine**

In una recente cartografia geologica (Bellucci et al., 1999) dell'Isola di Santo Stefano (Figura 7), sono state riconosciute tre differenti unità litostatigrafiche nominate:

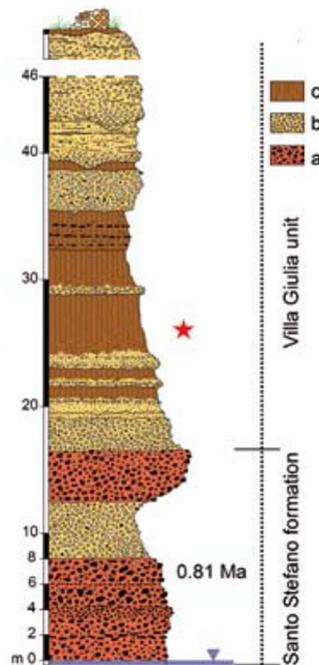
- Formazione di Santo Stefano;
- Unità di Villa Giulia;
- Depositi eolici.



**Figura 7: Carta geologica dell'isola di Santo Stefano da Bellucci et. al. 1999. a) lave e scorie; b) piroclastiti e pomici; c) piroclastiti e depositi eolici**

L'unità basale (Formazione di Santo Stefano) è suddivisa in due membri; il primo è costituito da lave con fratture colonnari e strutture a rampa che passano verso l'alto a livelli scoriacei. Questi depositi sono sovrastati dal secondo membro composto da depositi piroclastici massivi composti principalmente da frammenti di pomice sovrastate da livelli di scorie nere.

La Formazione di Santo Stefano è rimpiazzata verso l'alto da depositi piroclastici (Unità di Villa Giulia) attraverso una superficie irregolare. Questi depositi immergono radialmente e sono costituiti da un'alternanza di letti di pomici bianche da caduta e paleosuoli di origine piroclastica. Nella parte più alta dell'isola sono stati segnalati depositi eolici (Bellucci et al. 1999b) anche se oggi non sono riconoscibili a causa della copertura vegetale e della presenza degli edifici dell'ex carcere e relative pertinenze.



**Successione stratigrafica dell'Isola di Santo Stefano – a)lave e scorie; b) piroclastiti cementate sovrastanti le lave; c) piroclastici e livelli di pomici, paleosuoli (da Sacchi & Petti, 2008)**

Il rilievo di campagna ed una serie di sondaggi realizzati in corrispondenza del carcere, non confermano la presenza dei depositi eolici che con buona probabilità sono stati obliterati proprio dalla costruzione del carcere. Infatti, come evidenziato dalle stratigrafie di sondaggio, nella parte anteriore del carcere, al di sotto del piano fondale, che si trova a circa 2.5 m dal piano campagna, si rinviene spesso un riporto costituito da terreno misto a piroclastiti e clasti sia piroclastici che lavici. Ciò testimonia il lavoro di spianamento e compensazione dei punti più depressi del sito dei lavori di costruzioni del carcere risalenti alla fine del diciottesimo secolo.

È difficile distinguere il passaggio dal terreno di riporto al substrato geologico naturale in quanto il primo è costituito dal risultato degli scavi del secondo. Presumibilmente, al di sotto del piano fondale, il riporto ha uno spessore medio di 3.5 m, nella parte anteriore lato nord-est e si annulla nella parte anteriore lato nord/nord-ovest.

#### 4.5 Vincoli idrogeologici

La geomorfologia dell'isola è legata ai processi vulcanici che hanno portato alla formazione dell'isola stessa. Abbiamo già detto che Santo Stefano rappresenta un cono laterale relitto dell'antico edificio del vulcano Ventotene. La forma dell'isola è circolare con la zona centrale che si presenta più o meno pianeggiante e che degrada con pendenza sempre più accentuate man mano che si procede verso mare. Le falesie sono condizionate dalla litologia di tipo lavico e si presentano subverticali.

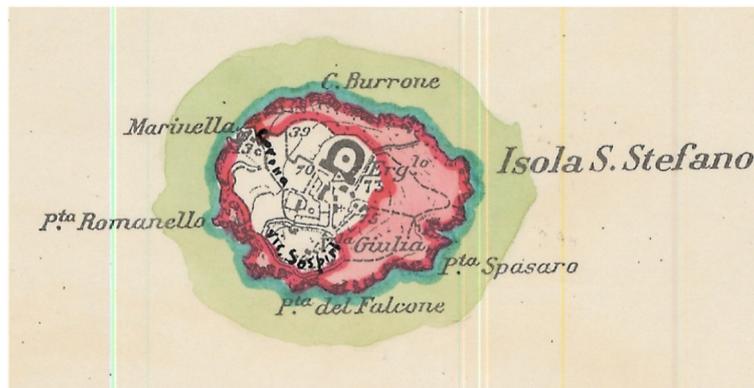
Tutto il perimetro dell'isola, in corrispondenza delle falesie, è cartografato A dal piano stralcio per l'assetto idrogeologico pericolo frana "Aree a Pericolo A (c. 2 art. 6 e art. 16)" EX AUTORITA' DEI BACINI REGIONALI DEL LAZIO-PIANO STRALCIO PER L'ASSETTO IDROGEOLOGICO (P.A.I.) - AREE SOTTOPOSTE A TUTELA PER DISSESTO IDROGEOLOGICO. Sono classificati a rischio R4 alcuni tratti del sentiero che conduce dall'approdo Marinella all'ex carcere ed un tratto del sentiero che dall'ex carcere porta allo scalo n.4. L'intero perimetro del Cimitero ricade in area rischio R4.

La fenomenologia del dissesto presente sulle falesie dell'isola e che coinvolge direttamente o indirettamente le opere sopra citate è da identificare principalmente in crolli. I crolli interessano diffusamente le falesie che bordano l'isola e sono localizzati soprattutto lì dove le famiglie di fratture principali, dovute alla fase di raffreddamento delle lave vulcaniche, incrociano fratture occasionali circa subverticali alle scarpate e formano cunei potenzialmente instabili. È stato effettuato un rilievo geomeccanico in prossimità dell'approdo Marinella e dello Scalo n. 4 per definire l'orientamento, la persistenza e tutte le altre caratteristiche delle fratture presenti per effettuare la verifica di stabilità.



**Figura 8 Aree sottoposte a tutela per dissesto idrogeologico**

Sul sito, oltre alle aree a vincolo frana identificata dal P.A.I., si ritrovano ulteriori vincoli di natura idrogeologica del R.D.L. n. 3267/23 e del R.D. n. 1126/26; di seguito lo stralcio cartografico che mostra in rosso le aree dell'isola interessate dal vincolo idrogeologico:



**Figura 9: Stralcio cartografico vincolo idrogeologico**

Per tali aree valgono le stesse considerazioni già espresse per il P.A.I.

È necessario sottolineare che, nell'ambito geologico-geomorfologico dell'opera in progetto, per il PTPR (piano Territoriale Paesaggistico Regionale) Santo Stefano rientra tra gli altri vincoli, nel sistema del paesaggio naturale definito come *"Territori caratterizzati dal maggiore valore di naturalità e seminaturalità in relazione alla presenza di beni di interesse vegetazione e geomorfologico e rappresentativi di particolari nicchie ecologiche"*. Gli obiettivi di qualità paesaggistica da perseguire in queste aree sono: mantenimento, conservazione e valorizzazione del patrimonio naturale anche mediante l'inibizione di iniziative di trasformazione territoriale pregiudizievole della salvaguardia.

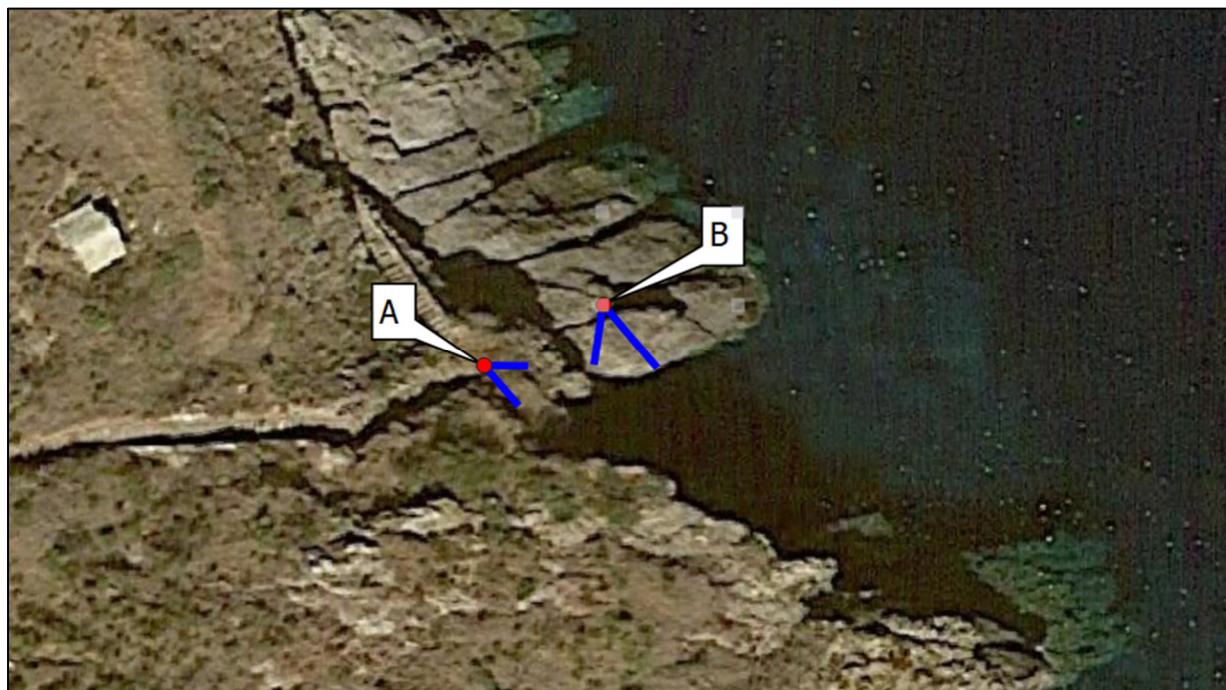
#### 4.6 Elementi della falesia a rischio crollo

L'insenatura naturale che ospita lo scalo n.4 (approdo costituito da scalini scavati nella roccia lavica) presentava, nella parte sommitale della falesia esposta verso N-NE, un blocco di roccia fratturato prossimo al crollo e che, come riportato in premessa, è stato recentemente interessato dalla caduta di una porzione di dimensioni considerevoli. La frattura principale, infatti, presentava una immersione a franapoggio, come il fronte della falesia interessata, e poteva essere classificata come giunto di trazione (foto 1, 2, 3).

In una prima fase conoscitiva, la geometria del blocco sembrava avere una dimensione stimata di circa 10 m<sup>3</sup>. Si notavano, inoltre, nella parte frontale dell'elemento, le superfici fresche lasciate dal precedente blocco crollato, valutato in circa 8 m<sup>3</sup> (foto 4).

Il disgaggio finale di quest'area, avvenuto nel corso dei lavori realizzati, ha riguardato un volume totale di circa 20 m<sup>3</sup> (foto 5, 7, 8); procedendo, infatti, con l'ispezione in corso d'opera, dopo un primo disgaggio, è stato necessario effettuare la demolizione di un secondo blocco che presentava una frattura aperta nella zona di valle (foto 7).

Dopo il disgaggio è stato eseguito un intervento di rinforzo corticale tramite pannelli di rete e funi e chiodature da 3,00 m e da 4,50 m di lunghezza, come meglio specificato nei paragrafi successivi,



**Figura 10: Vista aerea dello scalo con indicazione dei coni ottici di cui alle foto seguenti**



**Foto 1: Ante opera - Vista B del blocco a rischio crollo**



**Foto 2: Ante opera - Vista A del blocco a rischio crollo**



**Foto 3: Ante opera - Vista A con evidenza delle fratture**



**Foto 4: Ante opera - Vista B con evidenza delle fratture (blu) e della superficie di un precedente distacco (rosso)**



**Foto 5: Post opera - Vista A dopo il primo disaggio effettuato con malte espansive**



**Foto 6: Particolare della frattura residua dopo il primo disgaggio**



**Foto 7: Post opera - Vista dopo il disgaggio del grande blocco individuato come instabile**

Procedendo sul sentiero che parte dallo scalo 4, in corrispondenza della prima rampa, è presente un paramento in muratura in avanzato stato di degrado (*Foto 8 e 9*). Sulla parete si è eseguita la demolizione delle porzioni distaccate e poco cementate e, successivamente, si è applicata la rete in acciaio.



**Foto 8: Ante opera: paramento murario in avanzato stato di degrado**



**Foto 9: Ante opera - Dettaglio paramento murario**



**Foto 10: Post opera: Intervento di mitigazione sul paramento murario con reti, funi e chiodi**

In questa stessa area la falesia si presentava sormontata da una parte alterata delle lave e scorie

(membro stratigraficamente più alto della Formazione di Santo Stefano), per la presenza di vegetazione e per le azioni indotte dagli agenti atmosferici; queste porzioni di roccia erano caratterizzate da aggetti che avrebbero potuto causare il crollo di elementi lapidei, aventi dimensioni da piccole a medie (dell'ordine di qualche decimetro).

In questo caso l'intervento di messa in sicurezza si è concretizzato con la eliminazione delle cause dei potenziali crolli, scivolamenti, distacchi con cadute di detriti o massi, mediante una riprofilatura del versante (disgaggi), finalizzata alla eliminazione degli aggetti esistenti.

Su tutte le superfici trattate si è proceduto, quindi, con un intervento di rafforzamento e protezione mediante l'installazione di reti metalliche aderenti, ad alta resistenza, e funi d'acciaio diagonali per contenere la caduta di elementi lapidei di piccole dimensioni (decimetri). Il sistema delle reti e funi è stato fissato con barre di 3.0 m di lunghezza. L'intervento è stato esteso sul paramento in muratura di pietrame su richiamato.



**Foto 11: Ante opera - Aree sommitali della falesia costituite da fasce di alterazione aggettanti**



**Foto 12: Post opera – vista laterale**



**Foto 13: Post opera – vista frontale ripresa dal basso**

## 5 DESCRIZIONE DEGLI INTERVENTI DI SOMMA URGENZA ESEGUITI NEL 2023

### 5.1 Premessa

Si riporta una descrizione tecnica degli interventi locali di mitigazione del rischio dovuto ai crolli di elementi litoidi dalla falesia eseguiti nei *“Lavori di somma urgenza ex art. 163 D.Lgs. n. 50/2016 e ss.mm.ii. – falesie approdo scalo n. 4”*.

Si tratta, in particolare, di quegli interventi individuati a seguito delle osservazioni condotte sulle falesie dello scalo n.4 dell'Isola di Santo Stefano e, più in dettaglio, sui dissesti geo-idrologici che ne minacciano la stabilità, previsti a tutela della sicurezza delle maestranze attualmente impegnate sull'isola nell'ambito dei lavori di *“Recupero e rifunzionalizzazione ex carcere Borbonico dell'isola di Santo Stefano Ventotene - Intervento n. 1 Messa in sicurezza degli edifici”*, di cui al relativo Contratto Istituzionale di Sviluppo (di seguito CIS).

L'esigenza di eseguire gli interventi di seguito descritti è nata dal voler migliorare le condizioni di accesso in sicurezza delle maestranze impiegate sull'isola, nel caso in cui fosse utilizzato lo scalo n.4, per l'impraticabilità della Marinella, per le avverse condizioni meteo marine.

Per i motivi sopra riportati, sono state effettuate alcune ricognizioni presso lo scalo n.4, per osservare l'evolversi delle criticità relative al dissesto geo-idrologico delle falesie.

Oltre a confermare la pericolosità dei fenomeni gravitativi di tipo crolli di roccia, già oggetto di progettazioni riguardanti interventi di messa in sicurezza delle falesie, che trova riscontro nella perimetrazione del PAI dell'Autorità di Bacino Distrettuale dell'Appennino Centrale in fascia A (pericolosità molto elevata-vedi fig.1) e rischio R4, si è accertato un peggioramento dello stato di fratturazione dell'ammasso roccioso, in alcuni dei suoi elementi.



**Figura 11: area a pericolo e rischio frana – P.A.I. ex autorità dei bacini del Lazio**

Si è, quindi, eseguito un approfondimento dello stato conoscitivo attraverso l'affidamento e la esecuzione di servizi di rilievo geomeccanico da remoto dell'ammasso roccioso, presso gli scali interessati, mediante l'impiego di drone e laser scanner da terra.

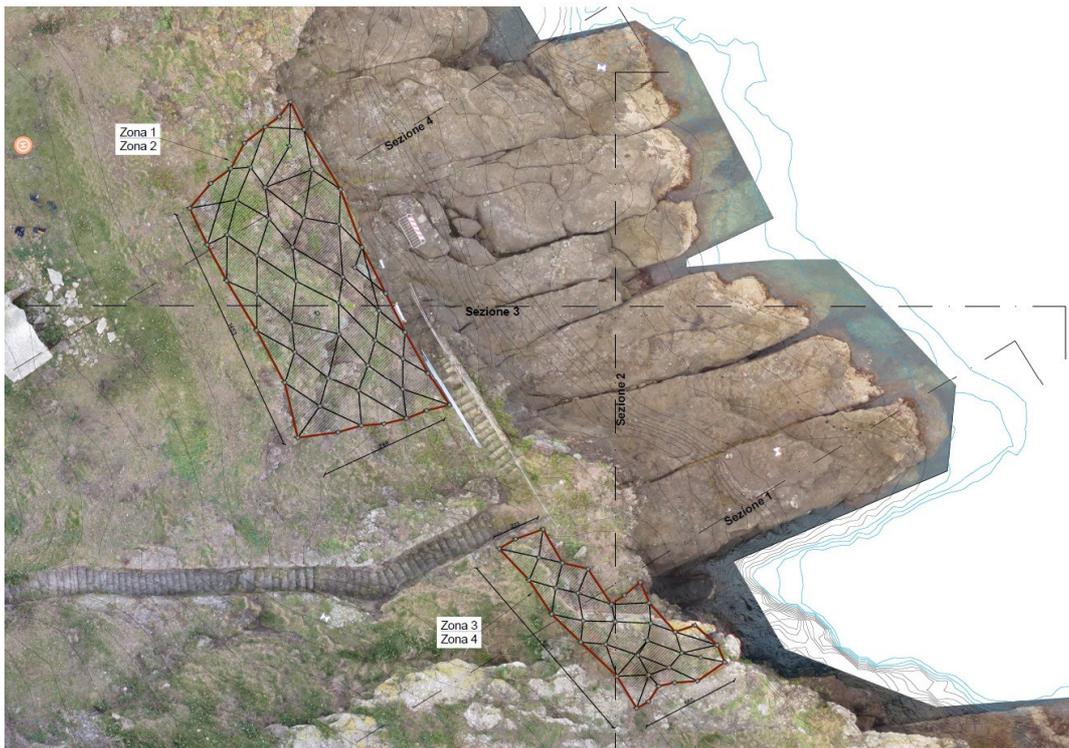
Gli esiti delle indagini hanno di fatto evidenziato la pericolosità di alcune zone già attenzionate, che il distacco roccioso dalla porzione di falesia che insiste sulla insenatura presente nella zona di approdo dello scalo 4, avvenuto nei primi giorni del mese di marzo u.s., ha definitivamente confermato.

Alla luce di quanto sopra riportato, si è individuata la necessità di procedere in urgenza alla realizzazione di alcuni interventi di mitigazione del rischio di instabilità locale dell'area dello scalo, con l'obiettivo di renderlo agibile per lo sbarco delle maestranze, attualmente impegnate nei lavori di messa in sicurezza dell'ex carcere borbonico, in presenza di condizioni meteo marine particolarmente avverse da non consentire l'approdo allo scalo Marinella.

La riapertura del percorso, interdetto per i motivi di sicurezza di cui sopra, garantisce, tra l'altro, una via di esodo alternativa, in caso di emergenza, anche per i visitatori occasionali che dovessero trovarsi nell'isola.

## 5.2 Zone di intervento

I lavori di mitigazione dei rischi di instabilità locale dell'area dello scalo n.4 hanno riguardato quattro settori o zone, come indicato negli stralci di planimetria, prospetto e sezioni seguenti. Per i dettagli esecutivi si rimanda alle tavole del progetto realizzato (As built) già citate.



**Figura 12: Zone di intervento – vista aerea con schematizzazione degli interventi**

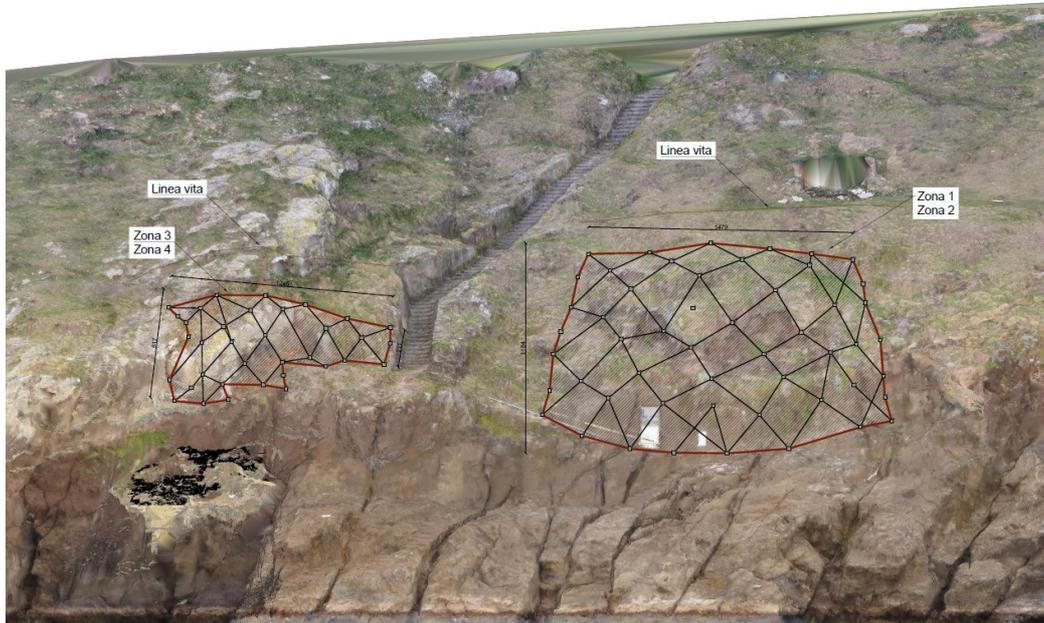


Figura 13: Zone di intervento – vista prospettica con schematizzazione degli interventi

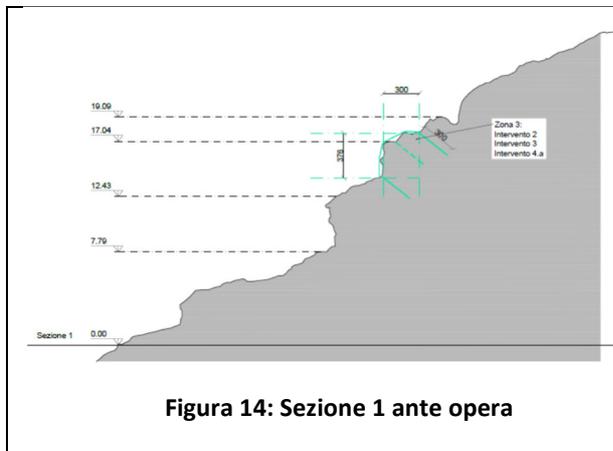


Figura 14: Sezione 1 ante opera

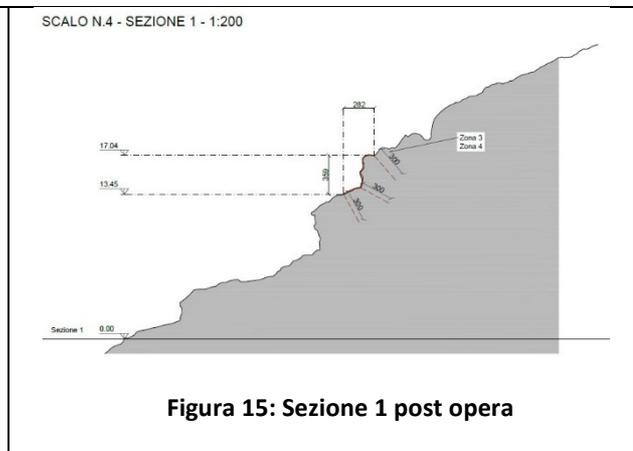


Figura 15: Sezione 1 post opera

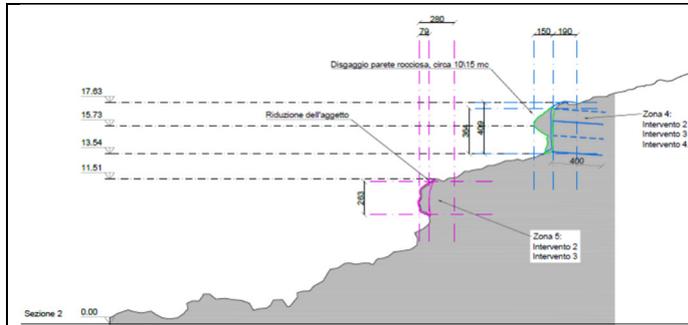


Figura 16: Sezione 2 ante

SCALO N.4 - SEZIONE 2 - 1:200

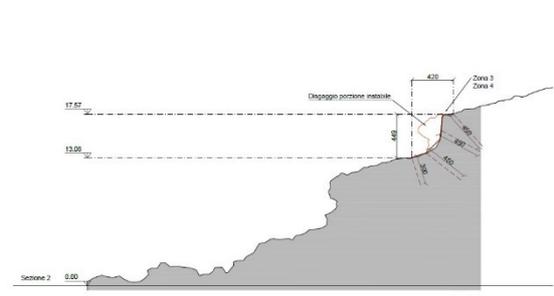


Figura 17: Sezione 2 post

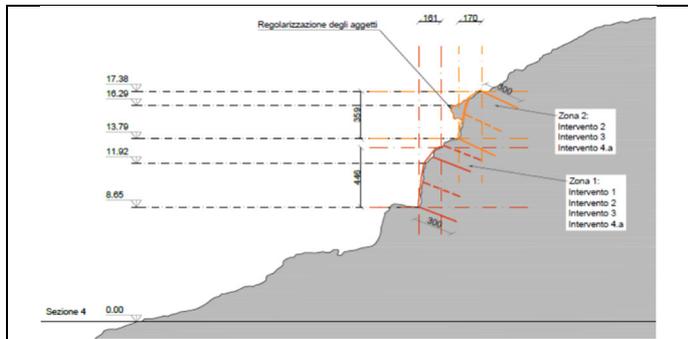


Figura 18: Sezione 3 ante

SCALO N.4 - SEZIONE 3 - 1:200

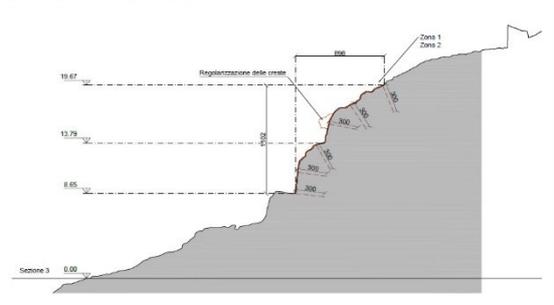


Figura 19: Sezione 3 post

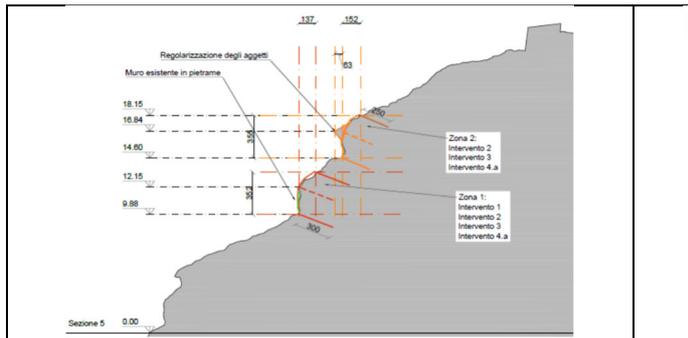


Figura 20: Sezione 4 ante

SCALO N.4 - SEZIONE 4 - 1:200

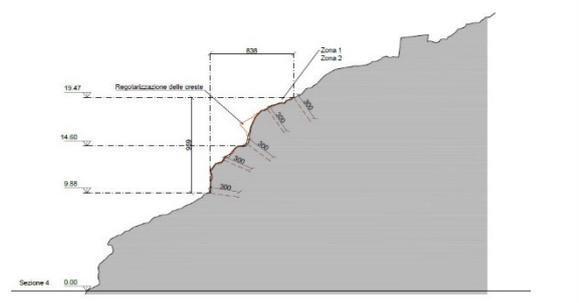


Figura 21: Sezione 4 post

Le zone di intervento sono state individuate sulla base delle criticità riscontrate nel corso delle ricognizioni e dai rilievi effettuati, come su documentato.

### 5.3 Tipologie degli interventi

Nella figura seguente si riportano le tipologie degli interventi applicati sulle quattro zone (le zone 1 e 2 e le zone 3 e 4 sono da ritenersi contigue).

ZONE	INTERVENTI ESEGUITI
Zona 1 Zona 2	Demolizione e regolarizzazione delle creste superiori aggettanti. Perforazione ed installazione di barre d'acciaio DYWIDAG 1050 Ø26,5 mm cementate con CEM II/A-LL 42,5 R, piastre in acciaio 200*200*10 mm e dado conico scanalato chiuso con calotta plastica protettiva - 52 barre L = 3000mm. Installazione di rete in filo d'acciaio ad alte prestazioni aderenti a maglia romboidale - 4 moduli 4*h15 m. Installazione di funi d'acciaio diagonali Ø12 mm disposti a serpentina. Installazione di fune d'acciaio perimetrale Ø16 mm disposto a serpentina.
Zona 3 Zona 4	Disgaggio chimico e meccanico della porzione instabile. Perforazione ed installazione di barre d'acciaio DYWIDAG 1050 Ø26,5 mm cementate con CEM II/A-LL 42,5 R, piastre in acciaio 200*200*10 mm e dado conico scanalato chiuso con calotta plastica protettiva - 15 barre L = 3000mm e 20 barre L = 4500mm. Installazione di rete in filo d'acciaio ad alte prestazioni aderenti a maglia romboidale - 2 moduli 4*h10 m e 2 moduli 4*h5 m. Installazione di funi d'acciaio diagonali Ø12 mm disposti a serpentina. Installazione di fune d'acciaio perimetrale Ø16 mm disposto a serpentina.

**Figura 22: Legenda esplicativa delle zone e delle tipologie di intervento**

#### 5.3.1 Intervento 1: Ispezione e pulizia della parete rocciosa

L'intervento di pulizia ha previsto la rimozione della vegetazione ed il disgaggio delle porzioni instabili per mezzo di piccole attrezzature meccaniche manuali. In fase preliminare e in corso d'opera è stata effettuata un'accurata ispezione con l'obiettivo principale di:

- verificare il contesto ai fini dell'applicabilità degli interventi di progetto;
- rilevare eventuali condizioni impreviste al momento del progetto;
- definire le soluzioni di ottimizzazione per la messa in opera degli interventi di progetto, degli apprestamenti di cantiere e delle misure di sicurezza a seguito degli approfondimenti fatti dalla Direzione dei Lavori.

#### 5.3.2 Intervento 2: Demolizione di porzioni rocciose in precarie condizioni di stabilità

La demolizione (disgaggio) di porzioni rocciose in precarie condizioni di stabilità è stata effettuata

per un blocco di dimensioni medio-grandi, nella zona 4, e per creste aggettanti, nelle altre zone. La demolizione dell'ammasso roccioso, soprattutto nella zona 4, è stata effettuata per via chimica e completata per via meccanica.

Nella demolizione chimica si è proceduto a realizzare una serie di fori tramite perforatrice di ridotte dimensioni, ad inserire le miscele espansive nelle perforazioni preliminarmente eseguite e nelle fessure presenti allo scopo di aumentare, in maniera controllata, lo stato di fratturazione fino a completa rottura, dislocazione e distacco.

Successivamente si è proceduto a sagomare la porzione di roccia con leve e martelli demolitori portatili.

Il volume di roccia demolito con entrambe le metodologie, nella zona 3 e 4, è stato di circa 25 m<sup>3</sup> di cui 20 m<sup>3</sup> ascrivibili alla massa instabile principale e 5 m<sup>3</sup> alle creste presenti sul ciglio di valle delle due aree.

In corso d'opera si è previsto un approfondimento di indagine del quadro fessurativo per definire le zone da disaggiare.

Per le porzioni aggettanti della zona 2, i volumi di demolizione sono risultati minori rispetto alle zone 3-4; il totale di roccia disaggiata è stato pari a circa 8 m<sup>3</sup>.



**Figura 23: zona 1-2: Creste aggettanti zona 1-2 ante opera**



**Figura 24: Creste aggettanti post opera**

### 5.3.3 Intervento 3: Rafforzamento e protezione della parete rocciosa mediante chiodature con barre metalliche, reti e funi in acciaio

L'intervento 3 è consistito nell'applicazione delle misure di rafforzamento e protezione della porzione di parete rocciosa interessata dagli interventi 1 e 2, mediante chiodature con barre metalliche, reti e funi in acciaio. L'intervento si prefigge i seguenti scopi principali:

- le chiodature consentono di aumentare la resistenza media dell'ammasso roccioso nella porzione superficiale, per effetto della ricucitura delle fessure principali e del parziale intasamento delle stesse indotto dalle iniezioni cementizie;
- le funi e la rete metallica consentono un confinamento superficiale della parete ed una protezione passiva dalla caduta dei massi.

Le fasi esecutive si sono susseguite come di seguito indicato:

- perforazioni ed installazione delle barre metalliche di chiodatura tipo Dywidag  $\varnothing$  26.5, di lunghezza 3.0 m (intervento zona 1, 2, 3 e 4) e 4.5 m (intervento zona 3 e 4), legate con miscele cementizie, con disposizione a maglia rombica, con densità di almeno 1 barra ogni 6mq. La geometria dei chiodi, come rappresentato negli elaborati grafici, ha previsto uno schema di una maglia 3 m x 2 m, nelle zone 1-2; nelle zone 3-4 la densità delle barre è

stata di circa 1 barra ogni 3,5 mq, dovendo adeguare la geometria alla morfologia non regolare della parete rocciosa.

- Messa in opera delle reti metalliche aderenti e delle funi metalliche  $\varnothing$  12 mm diagonali; in zona 1 e 2 sono stati installati 4 pannelli di rete in filo d'acciaio ad alta resistenza DELTAX G82/2 STAINLESS della GEOBRUGG di dimensione 4 mx15 m, per un totale di 240 mq. Nella zona 3 la rete ha dimensioni 8 m x 5 m, mentre nella zona 4 ha dimensioni 8 m x 10 m, per un totale di 120 mq.
- Fissaggio superiore e inferiore e perimetrale delle reti per mezzo di funi metalliche  $\varnothing$  16. Le funi sono state direttamente ancorate alle barre di chiodatura; per quanto riguarda le funi diagonali si precisa che le stesse sono state bloccate al di sotto delle piastre di contrasto delle barre di chiodatura, successivamente bullonate e serrate.
- Serraggio dei bulloni sulla testa dei chiodi;
- Messa in opera di calotte di protezione in materiale plastico sulla testata delle barre di ancoraggio, per garantire la durabilità dell'intervento, tenuto conto delle particolari condizioni ambientali del sito.

Per l'efficacia dell'intervento le reti e le funi sono state installate in aderenza alla parete rocciosa. Il sistema è, infatti, sufficientemente flessibile per adattarsi a morfologie non piane.



**Figura 25: Zona 1 e 2: Rete e barre di ancoraggio**



**Figura 26: Zone 3 e 4 - Rete e barre di ancoraggio**



**Figura 27: Particolare dettaglio di ancoraggio con rete, piastra, funi e calotta protettiva**

## 6 DESCRIZIONE DEGLI INTERVENTI IN PROGETTO

### 6.1 Tipologie e zone di intervento

Ad integrazione degli interventi di mitigazione eseguiti nei lavori di somma urgenza, su alcune zone residue, sulle quali non erano state individuate criticità per rischi a breve termine tali da giustificare un intervento urgente, sono stati applicati due diverse tipologie di intervento, di cui all'elenco seguente:

- **Intervento 1:** Ispezione e pulizia della parete rocciosa e demolizione di porzioni rocciose in precarie condizioni di stabilità;
- **Intervento 2:** Rafforzamento della parete rocciosa mediante chiodature con barre metalliche;

Nelle figure seguenti sono rappresentati gli interventi in progetto e gli ambiti di applicazione, insieme a quelli eseguiti in somma urgenza, trattandosi di estensioni da eseguire secondo le tipologie già impiegate e descritte. Per la relativa consultazione di dettaglio si rimanda agli elaborati grafici di progetto.

Nello specifico gli interventi integrativi riguarderanno la demolizione e regolarizzazione delle creste superiori aggettanti (Intervento 1), il rafforzamento della parete con perforazioni ed installazioni di barre d'acciaio tipo DYWIDAG  $\varnothing \geq 24\text{mm}$ , di lunghezza da 3,0 m e 4,5/6,0 m (intervento 2).

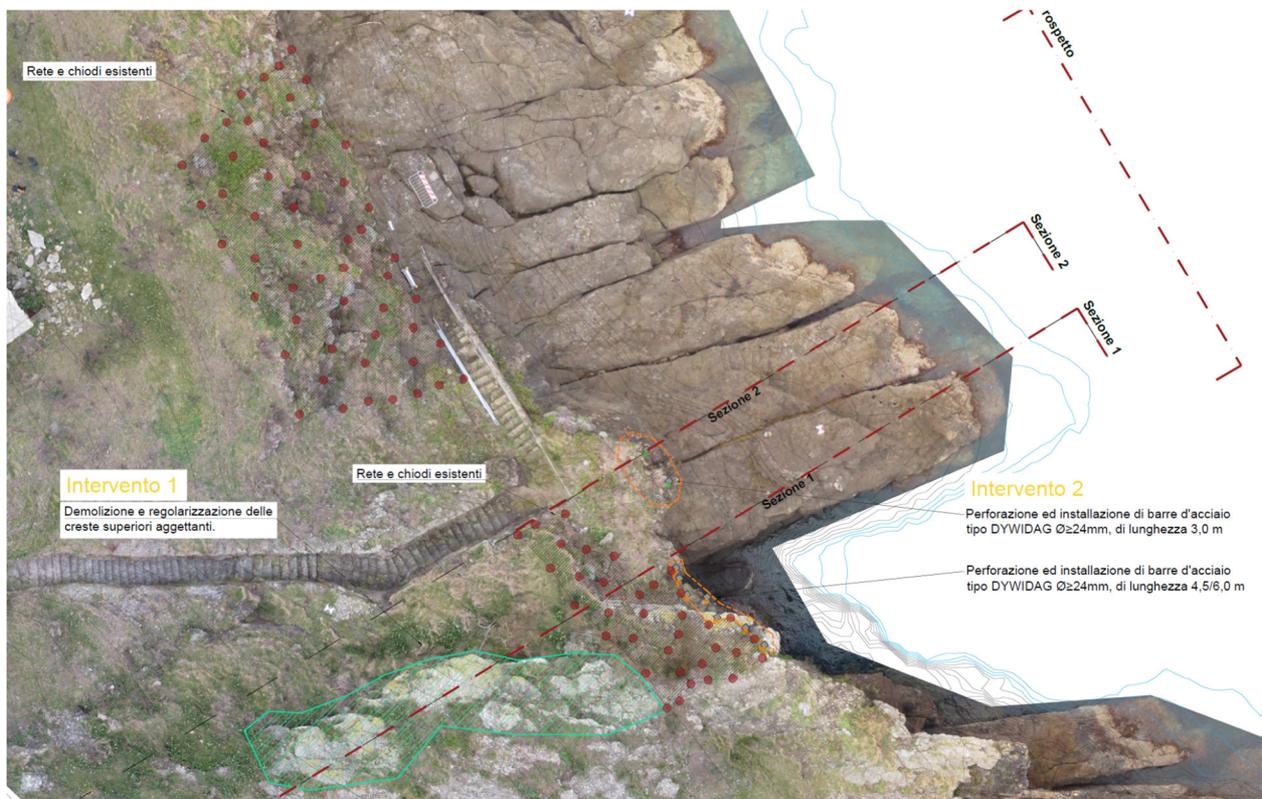
In particolare, nel fronte di falesia presente all'interno della insenatura e nella porzione immediata a destra, pur non riscontrando criticità per rischi a breve termine di importanti cadute di massi, si ritiene di intervenire per la presenza di fessurazioni e aggetti, soprattutto perché entrambe le zone sono particolarmente incumbenti sull'approdo e, quindi, sulle maestranze durante la fase di attesa, salita e discesa dalle imbarcazioni destinate al trasporto.

Su entrambe le zone si prevede l'applicazione di chiodature e il disgiungimento delle porzioni che dovessero rivelarsi a rischio di caduta.

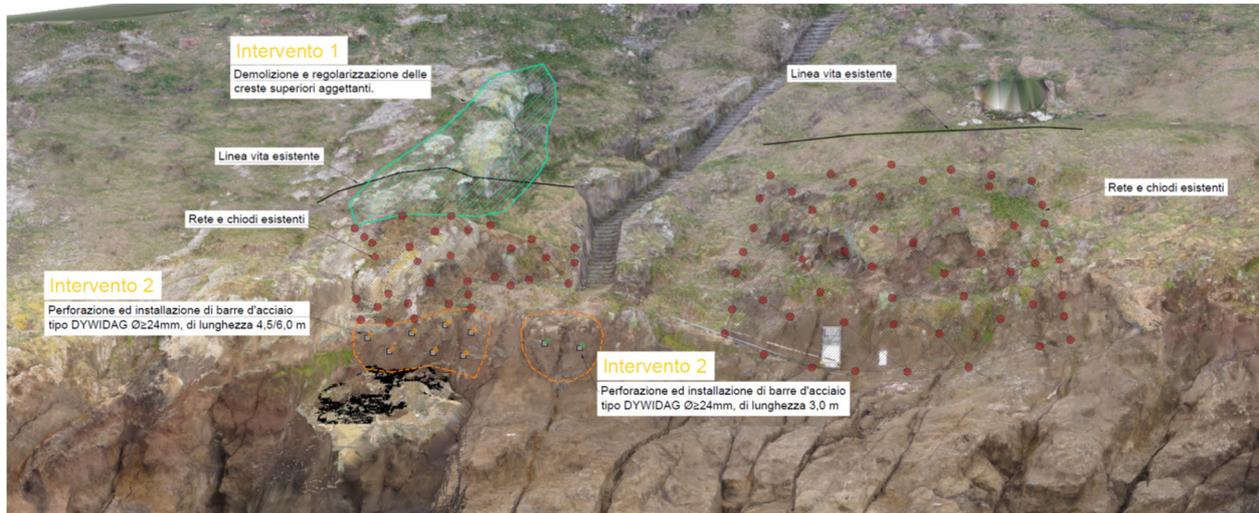
La consistenza degli eventuali interventi di disgiungimento potrà essere meglio definita dopo la pulizia

e l'ispezione. Si potrà anche valutare l'opportunità di applicare una rete per la protezione corticale che, sulla base delle osservazioni ad oggi condotte, non appare necessaria.

Sulla porzione di versante che insiste sulla seconda rampa di gradini del percorso che conduce all'ex carcere borbonico, si prevede un intervento di pulizia e disgiaggio delle porzioni non legate ed a rischio di caduta.



**Figura 28: Planimetria Interventi in progetto**



**Figura 29: Prospetto Interventi in progetto**

Come suddetto, gli interventi in progetto trovano giustificazione da condizioni di criticità rilevate nel corso dei rilievi, non tali da giustificare un intervento in somma urgenza, e consentono un miglioramento generale della porzione di falesia che insiste sulla zona di approdo dello scalo 4.

## 7 MATERIALI

### 7.1 Chiodature con barre tipo Dywidag

Tiranti di tipo passivo con Certificazione di Valutazione Tecnica rilasciato dal CSLPP o accompagnato da ETA.

Chiodi costituiti da barre filettate in acciaio armonico con le seguenti caratteristiche:

- Tensione caratteristica al carico massimo 1050 MPa;
- Tensione caratteristica allo 0.1% di deformazione residua 900 MPa;
- Allungamento totale percentuale a carico massimo 3.5%;
- Diametro M24;
- Rivestimenti protettivi zincatura a caldo.

Boiaccia per cavi di precompressione EN 447:

- Cemento tipo II o tipo III;
- Rapporto a/c <0.40-0.50;
- Fluidità iniziale 10-30 secondi;
- Fluidità a 30' <80 secondi;
- Essudamento <2%;
- Variazione di volume tra -1% e 5%;
- Resistenza a compressione >30 MPa.

Golfari femmina DIN 582:2021 in acciaio:

- Portata 1800 daN;
- Coefficiente di sicurezza 4:1;
- Misura M24;
- Rivestimenti protettivi zincatura a caldo.

### 7.2 Rete metallica

Rete in acciaio armonico inossidabile EN 10218-1,2, EN 10264-1,2 romboidale:

- Resistenza caratteristica al carico massimo 1775 MPa;
- Tipo di acciaio AISI316 (EN 1.4401);
- Diametro filo 2mm.

### 7.3 Fune metallica

Fune in acciaio armonico inossidabile ad anima metallica EN 10218-1,2, EN 10264-1,2:

- Resistenza caratteristica al carico massimo dei fili 1775 MPa;
- Tipo di acciaio AISI316 (EN 1.4401);
- Diametro nominale (DIN3060) 12-16 mm;
- Carico di rottura minimo 75(12) 133(16) KN.

## 8 Analisi di stabilità dei cunei e delle chiodature di consolidamento

### 8.1 Premessa

Per Dai test di Markland, è emersa la probabilità di distacco di cunei per l'area individuata; le informazioni derivanti dalle stazioni geomeccaniche, riguardanti il volume del cuneo, le giaciture, la resistenza dell'ammasso e dei giunti, sono implementate nelle analisi di stabilità dei cunei di roccia.

Nel seguito si espone la metodologia utilizzata, le ipotesi adottate ed i risultati dell'analisi.

### 8.2 Metodologia di analisi tridimensionale dei cunei di roccia

L'analisi del cinematiso tridimensionale dato dal distacco di un cuneo di roccia è svolta tramite il codice di calcolo *GeoRocce Dolmen 20* che implementa la geometria del cuneo tramite la definizione delle giaciture e del fronte che lo delimitano, svolgendo un'analisi rigido-plastica e indagando quindi l'equilibrio delle forze lungo i giunti; questi rappresentano le superfici di rottura preferenziali del sistema geotecnico, su cui si determinano staticamente, la sommatoria della resistenza al taglio disponibile e di quella effettivamente mobilitata, individuandone il coefficiente di sicurezza:

$$FS = \frac{\int_S \tau_{disp}}{\int_S \tau_{mob}} \quad \text{coefficiente di sicurezza}$$

Nell'ipotesi semplificativa di escludere il contributo delle chiodature e di considerare solo 2 famiglie di giaciture, lo schema statico si riduce a quello di Figura 30. Definendo gli angoli  $\psi_i$ ,  $\xi$  e  $\beta$ , e l'angolo di attrito  $\phi$  su entrambi i piani, il fattore di sicurezza risulta il seguente:

$$FS = \frac{\sin \beta \tan \phi}{\sin 0.5\xi \tan \psi_i}$$

Allo schema semplificato sopra esposto, il metodo utilizzato aggiunge la definizione di un giunto di trazione, la resistenza al taglio dei giunti principali definita con angolo d'attrito e coesione

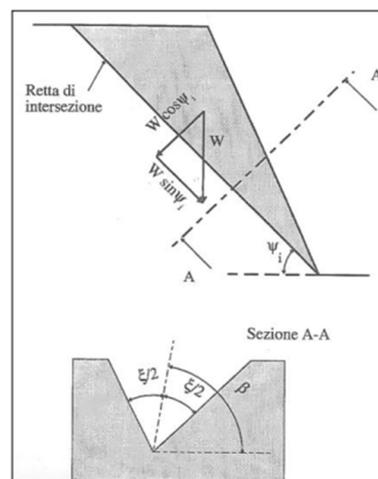


Figura 30. Schema semplificato

efficace, e la possibilità di inserire il contributo dei sostegni dati dagli interventi di consolidamento con le chiodature.

Lo schema completo di analisi del cuneo è esposto in Figura 31.

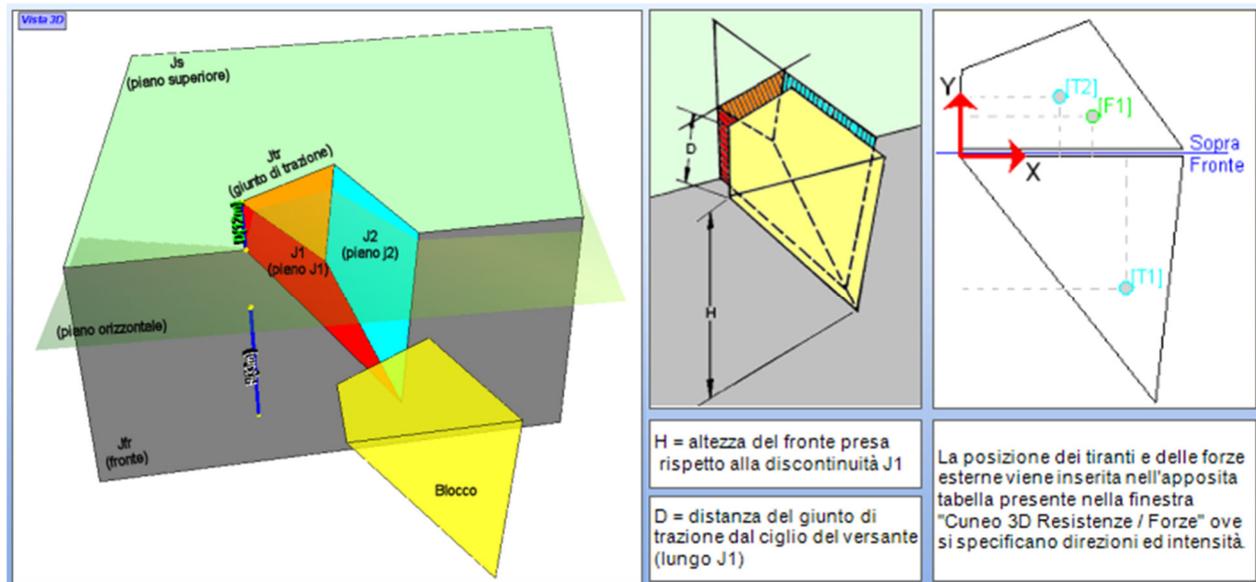


Figura 31. Schema completo di analisi tridimensionale dei cunei di roccia

In conformità alla normativa vigente (NTC-18), l'analisi deve svolgersi agli SLU, secondo l'Approccio 1, Combinazione 2. Pertanto, ai parametri geotecnici caratteristici di resistenza del terreno ( $c'$  e  $\phi'$ ), in condizioni statiche si applica il coefficiente parziale riduttivo  $\gamma_m = 1.25$  e l'analisi deve inoltre soddisfare un coefficiente di sicurezza  $\gamma_R = 1.1$ , mentre in condizioni sismiche non si applicano coefficienti riduttivi ai parametri del terreno e il coefficiente di sicurezza minimo deve risultare  $\gamma_R = 1.2$ .

### 8.3 Dati di input

#### 8.3.1 Volume e peso del cuneo di progetto

Dalla formulazione di Palmstrom [2005], come riportato al precedente paragrafo, risulta un volume massimo dei cunei di roccia con probabilità di distacco pari a circa  $4.5 \text{ m}^3$ .

Da tale considerazione, è stata dimensionata la spaziatura media delle chiodature di progetto di  $3.14 \text{ m} \times 1.57 \text{ m}$ , senza considerare quelle già realizzate dai precedenti interventi di

consolidamento richiamati. Tali interassi, ipotizzando uno spessore medio di 1.0 m, definiscono il seguente volume di influenza del singolo chiodo, assunto cautelativamente come volume rappresentativo per l'analisi di stabilità:

$$V \geq 3.14 \times 1.57 \times 1.0 = 4.93 \text{ m}^3$$

Ad esso, attribuendo il peso di volume  $\gamma = 18 \text{ kN/m}^3$  all'ammasso, corrisponde il peso  $G = 89 \text{ kN}$ .

### 8.3.2 Spinta sismica del cuneo di roccia

Per il sito di riferimento (Santo Stefano, LT) si ottiene la seguente caratterizzazione sismica:



Eliporto, 04020 Ventotene LT, Italia		CERCA
VITA NOMINALE:	CLASSE DI UTILIZZO:	
50 (anni)	Classe III	
VITA DI RIFERIMENTO:	SPETTRO:	
75	SLV 10%	
PROBABILITÀ DI SUPERAMENTO DELLA VITA DI RIFERIMENTO:	PERIODO DI RITORNO:	
10 %	712 (anni)	
LATITUDINE:	LONGITUDINE:	
40.78970	13.45551	
<b>RISULTATI:</b>		
AG/G:	FO:	TC:
0.0658	3	0.5

Figura 32. Classificazione sismica del sito

Per vita nominale  $V_N = 50$  anni, coefficiente d'uso  $C_U = 1.5$  (Classe d'uso III), categoria di sottosuolo B (si veda la relazione geologica), le accelerazioni massime attese al piano campagna sono pari a:

$$a_g = 0.0658 \text{ g}, \quad S_s = 1.2, \quad S_T = 1.0,$$

da cui:

$$a_{\max} = 0.0658 \cdot 1.2 = 0.099 \text{ g}.$$

L'inerzia sismica del cuneo di roccia di progetto, di peso  $G$ , vale quindi:

$$F_h = G \cdot a_{\max}/g = 89 \cdot 0.099 = 8.8 \text{ kN}$$

### 8.3.3 Resistenza allo sfilamento del singolo elemento di chiodatura

In considerazione delle caratteristiche tecnologiche e della natura dei terreni si valutano le tensioni “caratteristiche” di adesione laterale limite fondazione-terreno  $\alpha\tau_{lim}$ , riferite al diametro nominale di perforazione. Tali valori sono in accordo a quanto suggerito dall’esperienza di Bustamante e Doix per il caso in esame. Per l’ammasso in cui sono fondate le chiodature di progetto si assume cautelativamente il valore  $\alpha\tau_{lim} = 150$  kPa.

In accordo alla normativa vigente (NTC-18), tale valore deve essere fattorizzato per il coefficiente parziale  $\gamma_M$ , che vale 1.25, per il caso statico, e 1.00, per il caso sismico.

L’adesione laterale limite di progetto risulta quindi:

$$\begin{aligned} \alpha\tau_{lim,d} &= 120 \text{ kPa} && \text{adesione laterale limite di progetto in condizioni statiche,} \\ \alpha\tau_{lim,Ed} &= 150 \text{ kPa} && \text{adesione laterale limite di progetto in condizioni sismiche.} \end{aligned}$$

Si considera inoltre, in via cautelativa, una lunghezza della chiodatura reagente  $L_a = 3.0$  m. Dato il diametro di perforazione  $D_p = 75$  mm, si ricava la resistenza del singolo elemento di rinforzo, sottraendo, in condizioni sismiche, l’inerzia del cuneo:

$$\begin{aligned} R_d &= 0.075 \cdot \pi \cdot 120 \cdot 3 = 85 \text{ kN} && \text{resistenza a sfilamento in condizioni statiche,} \\ R_{Ed} - F_h &= 0.075 \cdot \pi \cdot 150 \cdot 3 - 8.8 = 97 \text{ kN} && \text{resistenza a sfilamento in condizioni sismiche.} \end{aligned}$$

Come mostrato dal confronto tra le precedenti resistenze, il caso statico, date le fattorizzazioni, è più critico del caso sismico. Nelle seguenti analisi, quindi, l’analisi sismica sarà trascurata.

#### 8.4 Risultati delle analisi

L'analisi tridimensionale dei cunei è condotta con le metodologie e le ipotesi progettuali sopra elencate, assumendo il volume di riferimento non inferiore a  $4.93 \text{ m}^3$ , considerando il solo caso statico, che risulta il più critico, al netto delle fattorizzazioni di normativa, per la resistenza delle chiodature di progetto.

L'incognita rimanente nelle analisi è quella della resistenza al taglio dei giunti, in cui si assumono angoli di attrito di  $35\div 37^\circ$ , e la coesione, tale per cui risulti un coefficiente di sicurezza dello stato di fatto (senza rinforzi) circa unitario. Tale condizione corrisponde ad una back-analysis di uno stato di fatto in cui i cunei di riferimento siano al limite della stabilità (sebbene le coesioni efficaci che determinano tale condizione siano basse).

A partire da tale quadro cautelativo, si valuta l'influenza dei sostegni misurandone l'efficacia in termini di aumento di fattore di sicurezza.

L'analisi è ripetuta per i vari casi di studio dati dai rilievi delle stazioni geomeccaniche:

- La stazione SG1 è stata ripetuta per le famiglie 3-4 e 4-5, dato che il test di Markland ha rilevato per entrambe le coppie di giaciture compatibilità cinematica e ammissibilità dinamica;
- Le stazioni SG2A e SG2B sono state analizzate solo per le coppie di famiglie maggiormente critiche (famiglie 3-4), invertendo però la posizione della famiglia con  $\text{dip}=85^\circ$ , con il fronte (rilevato con  $\text{dip}=75^\circ$ ); in tale modo il volume del cuneo e i piani di rottura sono i medesimi, ed il software utilizzato consente di inserire il sostegno di progetto con l'inclinazione ortogonale al fronte.

Per tutti i casi considerati, il coefficiente di sicurezza ottenuto dopo l'inserimento della chiodatura è non inferiore a 1.1 e, quindi, la verifica di stabilità risulta soddisfatta.

Si riassumono nel seguito i principali risultati:

- **SG1, famiglie 3-4:**
  - Back-Analysis cuneo: per giunti con  $\varphi'=37^\circ$  e  $c'=3.0 \text{ kPa}$  → FS = ~1.0
  - Stabilità cuneo in condizioni statiche con chiodatura → FS = 3.0

- **SG1, famiglie 4-5:**

- Back-Analysis cuneo: per giunti con  $\varphi'=37^\circ$  e  $c'=2.5$  kPa → FS = ~1.0
- Stabilità cuneo in condizioni statiche con chiodatura → FS = 3.6

- **SG2A:**

- Back-Analysis cuneo: per giunti con  $\varphi'=35^\circ$  e  $c'=4.8$  kPa → FS = ~1.0
- Stabilità cuneo in condizioni statiche con chiodatura → FS = 2.1

- **SG2B:**

- Back-Analysis cuneo: per giunti con  $\varphi'=35^\circ$  e  $c'=3.85$  kPa → FS = ~1.0
- Stabilità cuneo in condizioni statiche con chiodatura → FS = 2.2

L'intervento di chiodatura previsto risulta quindi adeguato, conferendo alla parete un sufficiente incremento di resistenza, con un buon margine rispetto ai minimi richiesti dalla normativa.

Si riportano di seguito le immagini degli output di dettaglio delle analisi svolte.

Come affermato in premessa, l'approccio numerico non può essere deterministico nella valutazione dei fattori di sicurezza; lo stato iniziale è stato posto, convenzionalmente e cautelativamente, con fattore di sicurezza prossimo all'unità (condizione al limite dell'equilibrio), ma che potrebbe essere anche superiore.

I risultati di rilevanza progettuale sono gli incrementi dei fattori di sicurezza a seguito degli interventi, che danno la misura dell'efficacia in termini relativi.

<b>angolo di attrito</b> $\phi$ (J1) = 37 ° $\phi$ (J2) = 37 °	<b>Fattori di Sicurezza calcolati</b> <input type="checkbox"/> CON ACQUA nel giunto di trazione, lungo piano di scivolamento e CON FORZE (tiranti, forze esterne) <b>Fs = ---</b> <input checked="" type="checkbox"/> CON ACQUA nel SOLO giunto e SENZA FORZE (tiranti, forze esterne) [J1J2] <b>Fs = 1.002</b> <input checked="" type="checkbox"/> SENZA ACQUA e SENZA FORZE (tiranti, forze esterne) [J1J2] <b>Fs = 1.002</b> <input checked="" type="checkbox"/> CON ACQUA nel SOLO giunto di trazione e CON FORZE (tiranti, forze esterne) [C] <b>Fs = 3.023</b> <input checked="" type="checkbox"/> Personalizzato <input checked="" type="checkbox"/> Acqua nel giunto 100 % <input checked="" type="checkbox"/> Forze e Tiranti <input type="checkbox"/> Acqua nei piani 100 % <b>Fs = 3.023</b>
<b>coesione</b> $c'$ (J1) = 3 kN/m2 $c'$ (J2) = 3 kN/m2	<b>Linea di intersezione J1 J2</b> $dip = 74.8$ ° $dipdir = -19.7$ °
<b>peso di volume roccia</b> $gr = 18$ kN/m3	
<b>Acqua</b> $gw = 10$ kN/m3	<b>Cuneo</b> $volume = 4.98$ m <sup>3</sup> $peso = 8.96$ t
<input type="button" value="Applica"/> <input type="button" value="Ok"/>	

Figura 33. SG1, famiglie 3-4: Analisi tridimensionale del cuneo, senza sostegno e con sostegno (FS = 3.0)

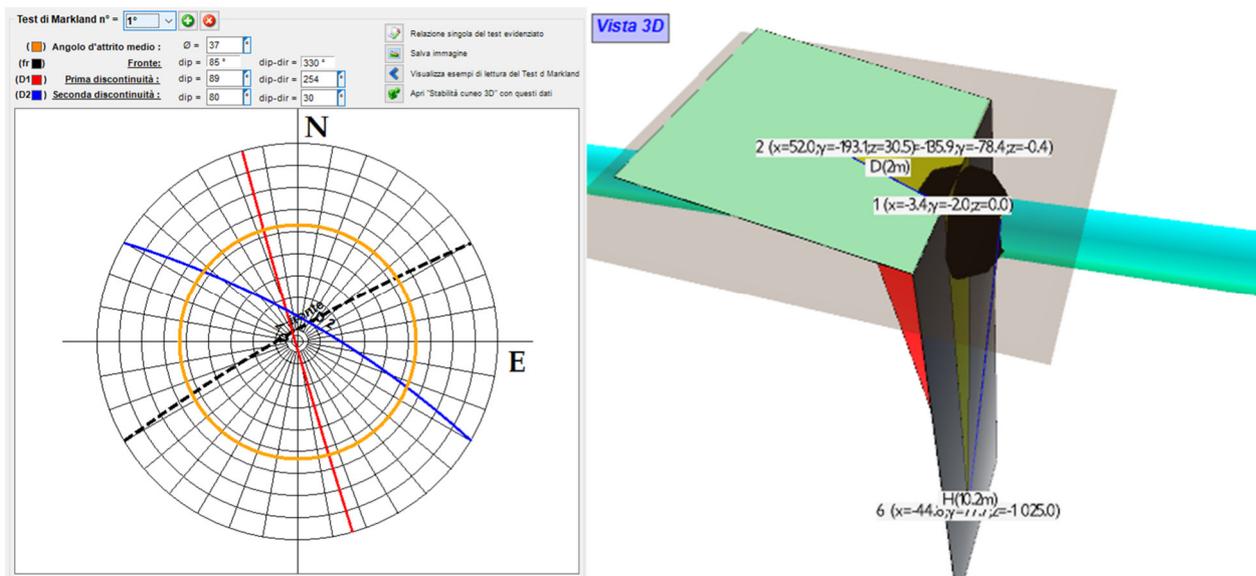


Figura 34. SG1, famiglie 3-4: Stereogramma delle giaciture e geometria del cuneo con il sostegno

<b>angolo di attrito</b> $\phi$ (J1) = 37 ° $\phi$ (J2) = 37 °	<b>Fattori di Sicurezza calcolati</b> <input type="checkbox"/> CON ACQUA nel giunto di trazione, lungo piano di scivolamento e CON FORZE (tiranti, forze esterne) $F_s = \text{---}$ <input checked="" type="checkbox"/> CON ACQUA nel SOLO giunto e SENZA FORZE (tiranti, forze esterne) [J1J2] $F_s = 1.072$ <input checked="" type="checkbox"/> SENZA ACQUA e SENZA FORZE (tiranti, forze esterne) [J1J2] $F_s = 1.072$ <input checked="" type="checkbox"/> CON ACQUA nel SOLO giunto di trazione e CON FORZE (tiranti, forze esterne) [J1J2] $F_s = 3.616$ <input checked="" type="checkbox"/> Personalizzato <input checked="" type="checkbox"/> Acqua nel giunto 100 % <input checked="" type="checkbox"/> Forze e Tiranti <input type="checkbox"/> Acqua nei piani 100 % [J1J2] $F_s = 3.616$
<b>coesione</b> $c'$ (J1) = 2.5 kN/m2 $c'$ (J2) = 2.5 kN/m2	
<b>peso di volume roccia</b> $gr = 18$ kN/m3	
<b>Acqua</b> $gw = 10$ kN/m3	
<b>Linea di intersezione J1 J2</b> $dip = 64$ ° $dipdir = 321.2$ °	<b>Cuneo</b> $volume = 5.3$ m <sup>3</sup> $peso = 9.54$ t
<input type="button" value="Applica"/> <input type="button" value="Ok"/>	

Figura 35. SG1, famiglie 4-5: Analisi tridimensionale del cuneo, senza sostegno e con sostegno ( $F_s = 3.6$ )

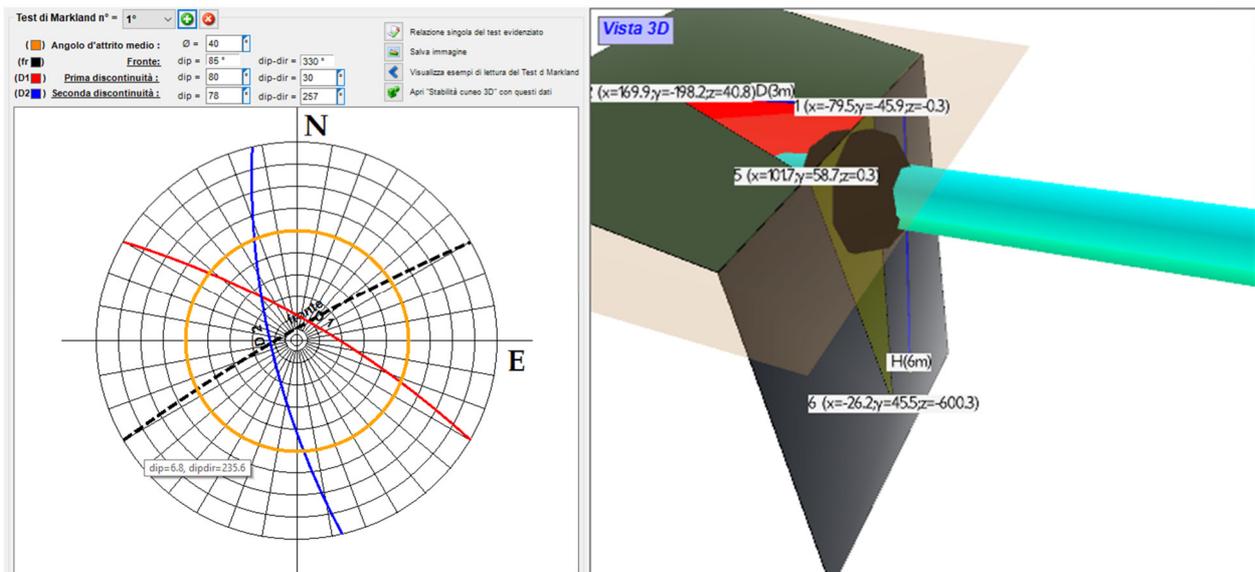


Figura 36. SG1, famiglie 4-5: Stereogramma delle giaciture e geometria del cuneo con il sostegno

<b>angolo di attrito</b> $\varphi$ (J1) = 35 ° $\varphi$ (J2) = 35 °	<b>Fattori di Sicurezza calcolati</b> <input type="checkbox"/> CON ACQUA nel giunto di trazione, lungo piano di scivolamento e CON FORZE (tiranti, forze esterne) $F_s = \text{---}$ <input checked="" type="checkbox"/> CON ACQUA nel SOLO giunto e SENZA FORZE (tiranti, forze esterne) [J1J2] $F_s = 1.005$ <input checked="" type="checkbox"/> SENZA ACQUA e SENZA FORZE (tiranti, forze esterne) [J1J2] $F_s = 1.005$ <input checked="" type="checkbox"/> CON ACQUA nel SOLO giunto di trazione e CON FORZE (tiranti, forze esterne) [J1] $F_s = 2.11$ <input checked="" type="checkbox"/> Personalizzato <input checked="" type="checkbox"/> Acqua nel giunto 100 % <input checked="" type="checkbox"/> Forze e Tiranti [J1J2] <input type="checkbox"/> Acqua nei piani 100 % $F_s = 2.11$
<b>coesione</b> $c'$ (J1) = 4.8 kN/m2 $c'$ (J2) = 4.8 kN/m2	<b>Linea di intersezione J1 J2</b> $dip = 71.5$ ° $dipdir = -56.8$ °
<b>peso di volume roccia</b> $gr = 18$ kN/m3	
<b>Acqua</b> $gw = 10$ kN/m3	<b>Cuneo</b> $volume = 4.94$ m <sup>3</sup> $peso = 8.89$ t

Figura 37. SG2A: Analisi tridimensionale del cuneo, senza sostegno e con sostegno (FS = 2.1)

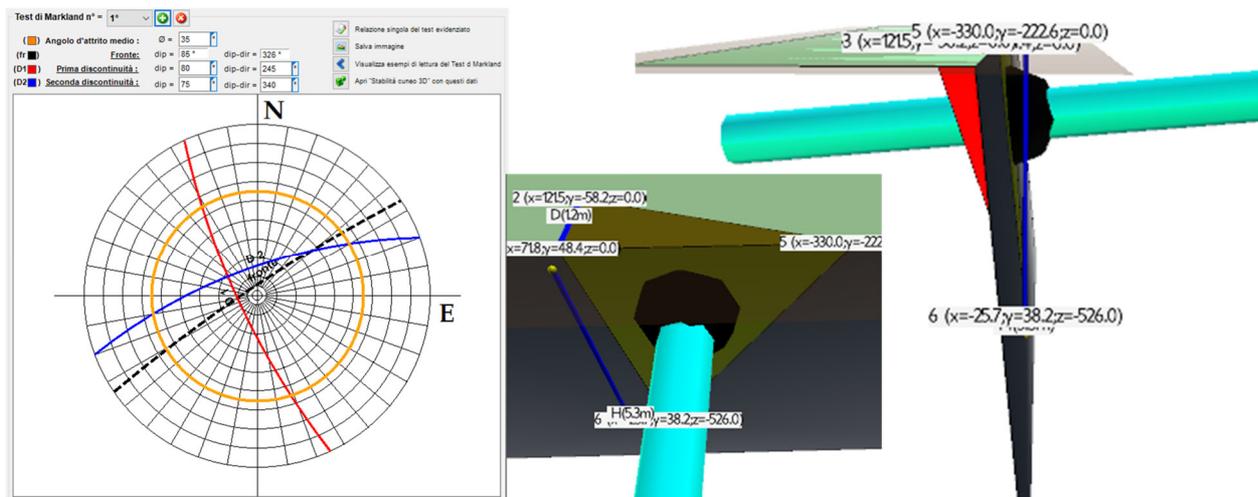


Figura 38. SG2A: Stereogramma delle giaciture e geometria del cuneo con il sostegno

<b>angolo di attrito</b> $\phi$ (J1) = 35 ° $\phi$ (J2) = 35 °	<b>Fattori di Sicurezza calcolati</b> <input type="checkbox"/> CON ACQUA nel giunto di trazione, lungo piano di scivolamento e CON FORZE (tiranti, forze esterne) $F_s = \text{---}$ <input checked="" type="checkbox"/> CON ACQUA nel SOLO giunto e SENZA FORZE (tiranti, forze esterne) [J1J2] $F_s = 1.006$ <input checked="" type="checkbox"/> SENZA ACQUA e SENZA FORZE (tiranti, forze esterne) [J1J2] $F_s = 1.006$ <input checked="" type="checkbox"/> CON ACQUA nel SOLO giunto di trazione e CON FORZE (tiranti, forze esterne) [C] $F_s = 2.246$ <input checked="" type="checkbox"/> Personalizzato <input checked="" type="checkbox"/> Acqua nel giunto 100 % <input checked="" type="checkbox"/> Forze e Tiranti <input type="checkbox"/> Acqua nei piani 100 % $F_s = 2.246$
<b>coesione</b> $c'$ (J1) = 3.85 kN/m2 $c'$ (J2) = 3.85 kN/m2	<b>Linea di intersezione J1 J2</b> $dip = 72.7$ ° $dipdir = -50.9$ °
<b>peso di volume roccia</b> $gr = 18$ kN/m3	
<b>Acqua</b> $gw = 10$ kN/m3	<b>Cuneo</b> $volume = 4.94$ m <sup>3</sup> $peso = 8.88$ t
<input type="button" value="Applica"/> <input type="button" value="Ok"/>	

Figura 39. SG2B: Analisi tridimensionale del cuneo, senza sostegno e con sostegno ( $F_s = 2.2$ )

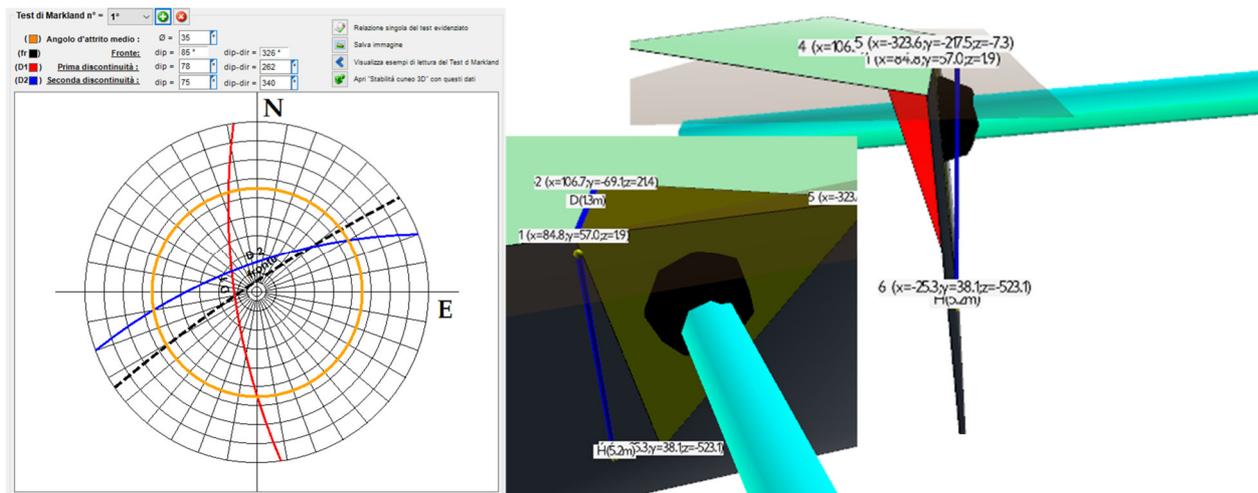


Figura 40. SG2B: Stereogramma delle giaciture e geometria del cuneo con il sostegno

## 9 MONITORAGGIO

### 1.1 Premessa

Nel presente capitolo viene illustrata una proposta per il monitoraggio di controllo negli ambiti dell'approdo Marinella, dello Scalo 4 e della zona del Cimitero.

Per le falesie dell'approdo Marinella si fa riferimento al presente progetto di mitigazione del rischio relativo ai distacchi di cunei rocciosi e di caduta dei massi.

Al momento non appare sussistano condizioni di criticità per la stabilità delle falesie, come blocchi di roccia in condizioni di precario equilibrio, con fessure in progressiva apertura, o evidenze di lenti movimenti sulle dislocazioni.

Gli interventi in progetto hanno carattere estensivo con scopi di presidio e contrasto per l'innescio di fenomeni deformativi. Gli interventi di tipo attivo (chiodature) conferiranno incrementi dei fattori di sicurezza alla stabilità globale e locale su scala metrica; gli interventi di tipo passivo (es. reti) conferiranno sicurezza alla stabilità locale su scala decimetrica.

Lo scopo principale del monitoraggio sarà, quindi, di controllo, con l'obiettivo di ottenere informazioni, sufficientemente tempestive, su eventuali movimenti dei punti osservati e per seguirne l'evoluzione.

Di questo si dovrà tener conto nella gestione delle misure che si dovrà protrarre per un lungo periodo (diversi anni), con basse frequenze nella programmazione di base di quelle non automatizzabili (es. rilievi topografici).

Per quanto riguarda la zona del Cimitero, caratterizzata da muretti di sostegno, da un rudere in pietra soggetti ad intervento di restauro strutturale in corso di esecuzione, si prospetta un monitoraggio delle deformazioni in alcuni punti significativi. Il controllo ha lo scopo di valutare l'efficacia degli interventi e la stabilità delle opere murarie.

La proposta per il monitoraggio comprende un sistema per la misura puntuale di deformazioni di tipo assoluto o relativo, misura diretta o di parametri correlabili alle deformazioni.

Le misure puntuali debbono essere riferite a punti significativi diffusi sulle zone di osservazione; esse consentono una elevata precisione ed una elevata frequenza e rapidità di dati, ove le misure possono essere automatizzate e remotizzate. Le misure puntuali, possibili su un numero relativamente limitato di punti, non consentono una buona visione globale dei fenomeni;

possono lasciare “zone d’ombra”, incertezze sulle interpretazioni, difficoltà a discernere errori o malfunzionamenti, specialmente in presenza di dati contrastanti.

Si propone quindi, ad integrazione del sistema puntuale, un sistema di osservazione su base fotografica che consente delle “mappature” periodiche ed una elaborazione dei confronti per il riconoscimento delle zone critiche.

Le quantità degli strumenti riportate nei paragrafi successivi, così come le posizioni rappresentate sulla tavola del monitoraggio, sono indicative e dovranno essere meglio definite in corso d’opera.

## 1.2 Tipologie delle misure e degli strumenti

Si riportano nel seguito le tipologie di misure e di strumenti previsti per l’attività di monitoraggio (si veda l’elaborato 2017E037INV-02-D-S0-TAV004 per le nomenclature e le posizioni):

### 1.2.1 Mire Topografiche (MT)

Il monitoraggio prevede un numero totale di 36 mire topografiche (MT):

- 13 sulle falesie nella zona approdo Marinella;
- 11 sulle falesie nella zona dello scalo 4;
- 12 sulle strutture del Cimitero.

Lo scopo del monitoraggio topografico è il rilievo delle coordinate delle mire a cadenza periodica, consentendo di rilevare le tre coordinate dei punti di misura e seguirne le evoluzioni ricavando le eventuali modifiche delle posizioni corrispondenti alle deformazioni in termini assoluti.

Le mire topografiche si integreranno in un sistema di rilievo topografico che comprenderà almeno 2 capisaldi di riferimento in una zona stabile, arretrata di almeno 25 m dai cigli delle falesie, un idoneo strumento di rilievo topografico, tipo stazione totale, punti e modalità di stazione, metodologia operativa per l’organizzazione, la gestione e l’interpretazione delle misure. Il caso in esame presenta diverse complessità; la logistica dei luoghi, con poco spazio per effettuare stazioni frontali alle falesie, la necessità di dover ricorrere a poligonali, con riduzione della precisione, e le condizioni ambientali.

L’esecuzione del ciclo di misure che, per il caso in esame non potrà essere automatizzato, sarà piuttosto onerosa. La frequenza delle misure, che di base dovrà essere plurimensile, potrà essere

eventualmente aumentata laddove ci saranno importanti evidenze (importanti variazioni sulle misure delle celle di carico, osservazioni sulla falesia, etc.).

I punti di misura hanno costi molto bassi e per questo conviene prevedere una certa ridondanza, utile per verificare l'affidabilità delle misure e per avere una scorta nei confronti di possibili danneggiamenti.

Si dovrà inserire sempre una mira topografica accanto ad altri punti di misura (BS CC), per ragioni di controllo.



**Figura 41: Mira topografica e miniprisma**

### 1.2.2 Celle di Carico sulla testata delle barre di chiodatura (CC)

Il monitoraggio prevede un numero totale di circa 10 celle di carico sulla testata delle barre di chiodatura per le falesie sullo scalo della Marinella.

Le celle di carico toroidali vengono installate fra il bullone di serraggio e la piastra di ripartizione della testata della barra di chiodatura, consentendo la misura dello sforzo assiale.

Per i casi in esame si osserva che le condizioni di instabilità dei cunei rocciosi si possono verificare per deformazioni relativamente piccole, per le quali il monitoraggio delle deformazioni potrebbe presentare una insufficiente precisione.

Per contro anche piccole deformazioni del cuneo roccioso possono mobilitare elevati incrementi di carico nelle celle (superiori alla precisione delle misure), per cui le misure di incrementi degli sforzi sulle celle di carico possono rappresentare importanti segnali di attivazione di fasi critiche, che potranno poi essere esaminati con l'intero quadro delle misure.

Un altro vantaggio del sistema delle celle è l'automatizzazione e la possibilità di remotizzare le misure; questo consente un'alta frequenza delle misure, la tempestività delle analisi dei dati, la definizione del *trend* e la riduzione dei costi relativi ai sopralluoghi.

La precisione e l'affidabilità del sistema sono verificabili dopo alcuni mesi; in particolare, occorrerà valutare l'influenza degli effetti ambientali, piuttosto severi nel sito di intervento.



**Figura 42: Celle di carico toroidali elettriche**

### 1.2.3 Misuratori di giunti o fessurimetri (MG)

Il monitoraggio prevede un numero totale di circa 5 fessurimetri (MG) da posizionare sulla falesia dell'approdo Marinella; le posizioni potranno essere definite in sito, a seguito di una attenta ispezione da parte del Direttore dei Lavori.

I misuratori di giunti o fessurimetri consentono di monitorare l'apertura di fessure nella direzione dei due supporti dello strumento.

Le variazioni di apertura delle fessure possono rappresentare importanti segnali di attivazione di fasi critiche, che potranno poi essere esaminati con l'intero quadro delle misure.

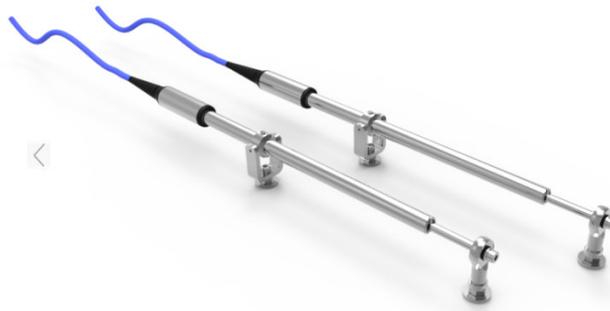
L'entità critica della variazione di apertura di una fessura è certamente superiore alla precisione dello strumento. Lo strumento può quindi fornire tempestivi ed importanti segnali di attivazione di fasi critiche, che potranno poi essere esaminate con l'intero quadro delle misure.

Un vantaggio del sistema delle celle è l'automatizzazione e la possibilità di remotizzare le misure; questo consente un'alta frequenza delle misure, la tempestività delle analisi dei dati, la definizione del *trend* e la riduzione dei costi relativi ai sopralluoghi.

La precisione e l'affidabilità del sistema sono verificabili dopo alcuni mesi; in particolare, occorrerà valutare l'influenza degli effetti ambientali, piuttosto severi nel sito di intervento.

L'installazione deve essere effettuata su fessure suscettibili di apertura per un possibile cinematisimo di instabilità di un cuneo roccioso, nella direzione dell'apertura o della dislocazione

fra i lembi. Le posizioni potranno quindi essere definite sul luogo, a seguito di una ispezione mirata.



**Figura 43: Misuratori di giunti, o fessurimetri, di tipo elettrico**

#### 1.2.4 Termometri (TM)

Il monitoraggio prevede un numero totale di 3 termometri (TM):

- 2 nella zona dello scalo della Marinella;
- 1 nella zona dello scalo 4.

Le misure delle temperature consentono di monitorare il fattore ambientale che maggiormente influenza il monitoraggio. I cicli giornalieri e stagionali delle variazioni delle temperature possono essere confrontati con analoghi cicli sui valori delle misure strumentali, in maniera da comprendere le correlazioni e poterne depurare gli effetti.

Anche le misure termometriche sono automatizzate e remotizzate.

#### 1.2.5 Monitoraggio su basi fotografiche

La proposta di monitoraggio si può definire una sovrapposizione di immagini digitali acquisite in tempi diversi sulla stessa area ed una successiva elaborazione dei confronti in termini di spostamenti differenziali secondo un algoritmo del tipo *change detection* o *digital image correlation*; nei casi in esame l'acquisizione delle immagini si effettuerà da drone.

Al fine di seguire l'andamento temporale del fenomeno si effettuerà un rilievo da remoto, ripetuto nel tempo.

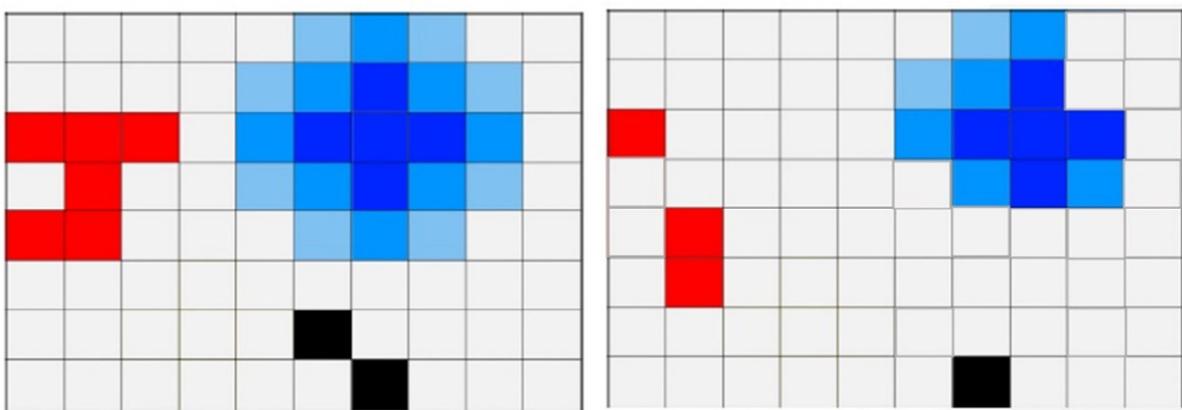
Tale sistema, che rientra nel campo del monitoraggio fotografico, è costituito essenzialmente da una fotocamera (sensore ottico) trasportata da drone che consentirà l'acquisizione di immagini

digitali con caratteristiche di risoluzione geometrica (pixel) e radiometriche note, con cadenza temporale, funzione del fenomeno che si sta osservando; nel nostro caso il rilievo verrà effettuato ogni 2 mesi circa.

La sovrapposizione di immagini ripetute nel tempo da sensore ottico, infatti, è una nuova soluzione di monitoraggio che sfrutta la grande diffusione nel mondo di sensori ottici/multispettrali al fine di ottenere informazioni circa i cambiamenti o gli spostamenti del terreno, mediante opportune tecniche di Digital Image Processing (DIP), ovvero la manipolazione di immagini digitali per ottenere dati ed informazioni. Esso opera a diverse scale spaziali e temporali, rappresentando uno strumento ideale per lo studio e il monitoraggio di processi deformativi superficiali.

Il concetto fondamentale alla base di tale tecnica è l'individuazione, all'interno dell'immagini analizzate, di "Features" quali strutture come punti, linee nonché pattern più complessi oppure colore, luminosità e contrasto. Attraverso il confronto con un'ulteriore immagine, le "Features" successivamente possono essere soggette a due tipologie di analisi principali:

- Change Detection (CD): attraverso la quale si ricercano "Features" che compaiono o scompaiono all'interno della scena; la ricerca avviene (a) valutando una variazione di luminosità e/o esposizione, (b) valutando il rapporto tra le intensità dei pixel in differenti bande oppure (c) valutando l'assenza\presenza di linee e pattern che implicano cambiamenti di forma e struttura;



**Figura 44: Esempio di comparsa o scomparsa di "Features" tra due immagini che riprendono la stessa scenama in due momenti differenti.**

- Digital Image Correlation (DIC): attraverso la quale si identificano e tracciano soltanto le "Features" riconducibili a linee e pattern, identificandone i cambiamenti di posizione sui fotogrammi. E dunque una misurazione ottico-numerica in grado di misurare spostamenti e deformazioni superficiali che avvengono esclusivamente lungo il piano del fotogramma, ovvero perpendicolare alla linea di vista;

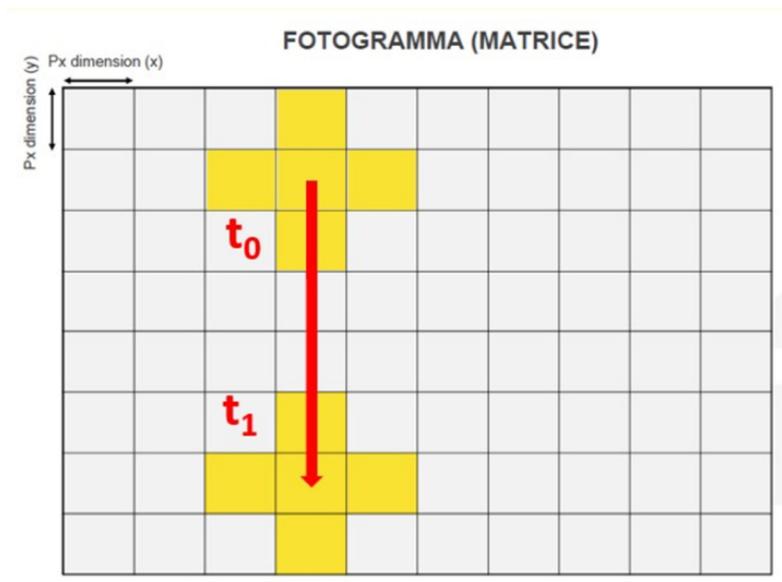


Figura 45: Esempio di tracciamento "Features".

Nel caso in esame l'analisi effettuata sarà, visto il fenomeno in atto o potenziale, di tipo *change detection*.

Le caratteristiche del sistema (es. tipologia di sensore e ottica, ubicazione del sistema), tali da raggiungere le condizioni ottimali richieste per effettuare il monitoraggio ed il controllo del fenomeno oggetto di indagine, sono:

- Risoluzione Geometrica - Viene comunemente riferita al numero di pixel (celle della matrice) che costituiscono l'immagine digitale. In tal senso, maggiore è il numero dei pixel, maggiore sarà la risoluzione e minore sarà la dimensione minima degli oggetti ripresi che può essere rilevata.
- Risoluzione Radiometrica - Rappresenta la minima differenza di intensità che un sensore può rilevare tra due valori di energia. Maggiore è la risoluzione radiometrica di un sensore, più sensibile è nel registrare piccole differenze nell'energia riflessa o emessa.

- Risoluzione Spettrale - Rappresenta il numero di bande spettrali di acquisizione e la loro ampiezza. Può essere anche definita come la capacità di risolvere le caratteristiche di un oggetto nel campo elettromagnetico.
- Risoluzione Temporale - Viene definita come il periodo di tempo che intercorre tra due riprese successive di una stessa area, detta comunemente anche “frequenza di campionamento”.

Per effettuare monitoraggio attraverso la tecnica della sovrapposizione di immagini digitali da fotocamera fissa o da drone, siano esse analisi di DIC o di CD, e poter estrapolare informazioni attendibili rispetto ad una grandezza variabile da tenere sotto controllo (quantità di spostamento, velocità di spostamento, cambiamenti, etc.) è necessario che le immagini da analizzare siano sottoposte in via preliminare ad un processo di allineamento preciso, ovvero ad uno step di "co-registrazione". L'obiettivo di questo step è quello di ottenere due o più immagini confrontabili; questo diventa possibile attraverso diverse tipologie di trasformazioni che si applicano alle immagini da allineare (Slave), rispetto ad un'immagine di riferimento (Master). La fase di Co-registrazione risulta quindi un passaggio cardine ed indispensabile per la sovrapposizione di immagini digitali.

Infine, sarà necessario processare i dati acquisiti con software dedicato con algoritmo che consenta il *change detection*.

Grazie all'acquisizione di immagini da drone, sarà possibile in fase di processamento dei dati fare un confronto sulla nuvola di punti acquisiti; in tal modo sarà possibile identificare, oltre agli eventuali distacchi, la volumetria del materiale crollato.

### 1.3 Figure con l'ubicazione dei punti di misura

Nelle figure seguenti si riportano le posizioni schematiche dei punti di misura e gli strumenti proposti.

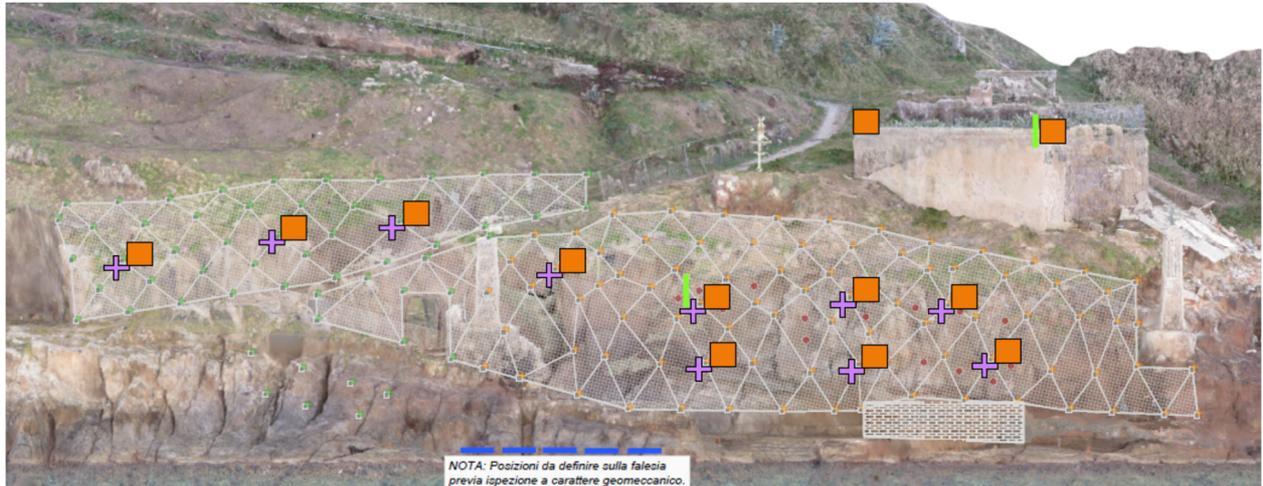
**LEGENDA**

	<p><b>MT</b> Mire Topografiche Totale n. 13 Zona approdo Marinella Totale n. 11 Zona Scalo n.4 Totale n. 10 Zona Cimitero</p>
	<p><b>CC</b> Celle di Carico sulla testata delle barre di chiodatura Totale n. 10 Zona approdo Marinella</p>
	<p><b>MG</b> Misuratori di Giunti o fessurimetri Totale n. 5 Zona approdo Marinella <i>NOTA: Posizioni da definire sulla falesia previa ispezione a carattere geomeccanico.</i></p>
	<p><b>TM</b> Termometri Totale n. 2 Zona approdo Marinella Totale n. 1 Zona Scalo n.4</p>

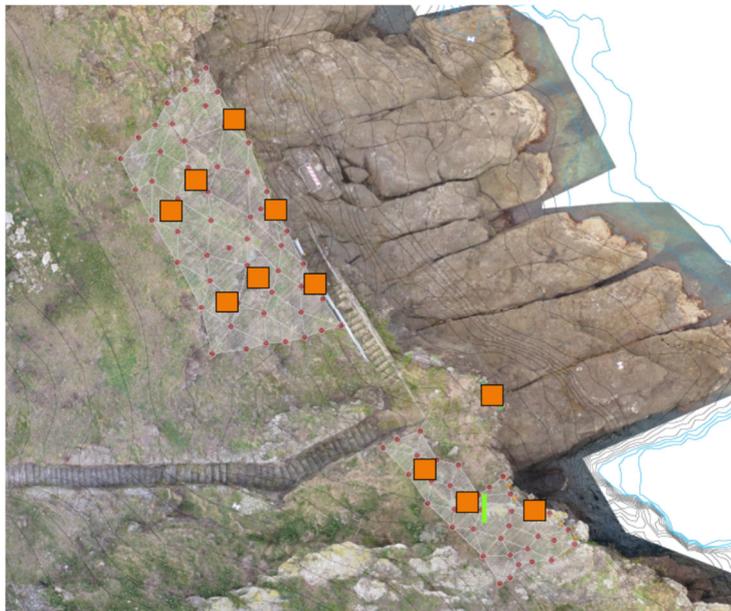
Figura 46. Legenda dei punti di misura e delle strumentazioni di monitoraggio



Figura 47. Planimetria punti e strumenti di monitoraggio scalo Marinella



**Figura 48. Prospetto punti e strumenti di monitoraggio scalo Marinella**



**Figura 49. Planimetria punti e strumenti di monitoraggio scalo 4**

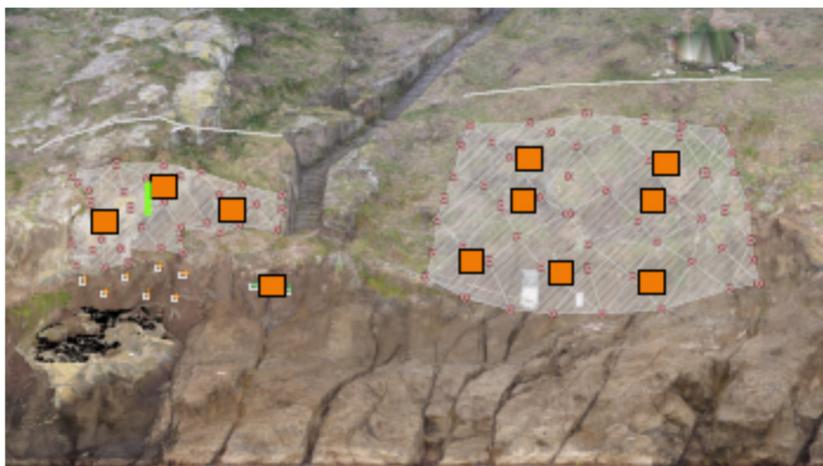


Figura 50. Prospetto punti e strumenti di monitoraggio scalo 4



Figura 51. Planimetria punti e strumenti di monitoraggio zona cimitero

#### 1.4 Durata del monitoraggio e frequenze delle misure

Il monitoraggio proposto è un'attività di controllo e non è definibile a priori una durata, se non convenzionale; una durata minima dovrebbe comprendere almeno tre (3) cicli stagionali completi

Le frequenze delle misure possono essere, indicativamente:

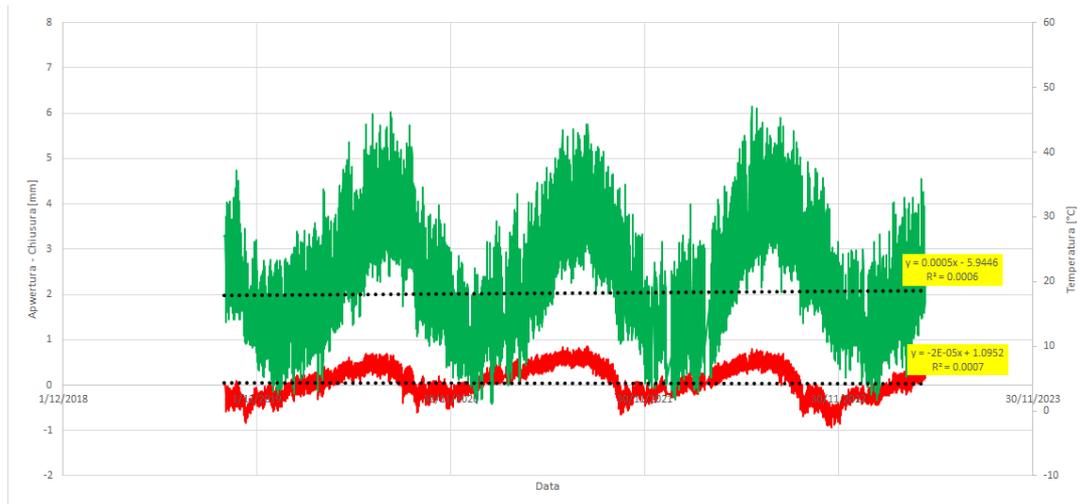
- 2 volte al giorno per quelle automatiche;
- Ogni 3 mesi per i rilievi topografici a regime, con una frequenza di 1 volta ogni 2 mesi, nel primo anno. L'aumento della frequenza delle misure topografiche nel primo anno ha lo scopo principale di ottimizzare e perfezionare le modalità di esecuzione delle misure e la precisione del sistema;
- Ogni 2 mesi per il monitoraggio su basi fotografiche nel primo anno.

### 1.5 Annotazioni

L'installazione precisa dei punti di misura proposti dovrà essere stabilita in loco, in accordo con il Direttore dei Lavori ed il Progettista, in relazione alla conformazione dei luoghi e tenendo conto dell'efficacia e degli aspetti di logistica.

Per la definizione delle soglie di controllo (attenzione e allarme) sarà necessario attendere il primo ciclo di misure (almeno 1 anno) di tutto il sistema di monitoraggio; si ricorda che i crolli in roccia sono una fenomenologia che non permette di definire facilmente soglie di innesco prestabilite, vista l'estrema velocità con cui avvengono senza particolari preavvisi (spostamenti submillimetrici, aumento di carico repentino). Si osserva, inoltre, che le condizioni ambientali dei luoghi di osservazione sono particolarmente severe e possono condizionare le misure in termini più che millimetrici, quindi con oscillazioni anche superiori ai valori stessi della misura.

Nella figura seguente si mostra un esempio in cui l'apertura di una fessura è praticamente stabile nel periodo monitorato di 4 anni con evidenza di importanti oscillazioni dei valori delle misure dovute principalmente agli effetti termici sia stagionali che giornalieri.



**Figura 52: Andamento delle misure delle temperature (verde) e dell'apertura di una fessura (rosso) per un periodo di osservazione di 4 anni.**

Si dovrà individuare operatori, esperti ed adeguatamente referenziati, per lo svolgimento dei servizi seguenti:

- a) installazione degli strumenti, architettura del sistema, cablaggio, energizzazione, manutenzione degli strumenti, acquisizioni locali e trasmissioni dei dati;
- b) acquisizione delle basi fotografiche digitali ed elaborazioni dei confronti.

Si dovranno definire i ruoli, almeno per il primo anno di gestione delle misure, per lo svolgimento dei seguenti servizi:

- c) data management, progetto e gestione del sito Web, validazione dei dati di misura, report e liste di pubblicazioni; è consigliabile che sia lo stesso soggetto a cui è stato affidato il servizio di cui al punto precedente (a);
- d) Interpretazione delle misure e pubblicazione dei relativi report periodici in relazione agli obiettivi del monitoraggio ed eventuali segnalazioni di criticità; è consigliabile che sia un soggetto diverso da quello a cui è stato affidato il servizio a); non va esclusa la possibilità che possa essere il progettista degli interventi.

L'esperienza del primo anno potrà fornire quelle informazioni utili per ottimizzare il sistema di ricezione e per garantire una efficiente gestione delle misure.